EL BIG BANG

GAMOW

El conocimiento en expansión



NATIONAL GEOGRAPHIC

GEORGE GAMOW forma parte de aquel selecto grupo de científicos cuya ansia de conocimiento les hace escudriñar en las más variadas disciplinas. Y es que este ruso nacionalizado estadounidense se adentró tanto en el mundo de lo infinitesimal como en la infinitud del universo: estudió el núcleo atómico y su colaboración fue fundamental para desentrañar los secretos del código genético; en astrofísica estableció modelos que esclarecieran la generación de la energía de las estrellas y su evolución, y, más aún, defendió la hipótesis del Big Bang como explicación del origen del universo, modelo que ha sido corroborado posteriormente por numerosas evidencias.

EL BIG BANG

GAMOW

El conocimiento en expansión

NATIONAL GEOGRAPHIC

ANTONIO M. LALLENA ROJO es catedrático de Física Atómica, Molecular y Nuclear, y desarrolla su trabajo de investigación en las áreas de Física Nuclear Teórica y Física Médica. Colabora con investigadores de distintas universidades españolas, europeas e hispanoamericanas y de servicios de radiofísica de varios hospitales.

© 2014, Antonio M. Lallena Rojo por el texto
© 2014, RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2014, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: Luz de la Mora

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Age Fotostock: 53a, 71a, 71b, 107b, 137ad, 145; Album: 26; Archivo RBA: 25ad, 28, 97, 137ai, 137b; Centre for Material Texts: 109; G. Coopmans/AIP Emilio Segrè Visual Archives: 113; Departamento de Física/Universidad de Colorado, Boulder: 25ai, 39; Encyclopedia Americana, v. 17: 25b; Instituto Cinematográfico Danés: 49; Boris Kustodiev/Colección Kapitsa, Moscú: 67; Serge Lachinov: 53b; Lawrence Livermore National Laboratory: 81; Los Alamos National Laboratory: 90; NASA/Theophilus Britt Griswold/WMAP Science Team: 107a; Doris Ulmann: 139.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-7774-9
Depósito legal: B-18561-2016

Impreso y encuadernado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

Sumario

Introducción

El medio siglo transcurrido entre 1865 y 1915 puede considerarse, sin duda, como el de mayor impacto en la Física como disciplina científica moderna. En 1865, Maxwell formuló las famosas ecuaciones que llevan su nombre, que describen los fenómenos asociados al campo electromagnético, y se puso así en marcha la primera de las tres grandes «revoluciones» de la física que vieron la luz en esos años. A partir de ese momento se fueron estableciendo las bases (tanto experimentales como teóricas) que permitieron alumbrar las otras dos, nacidas en los primeros años del siglo XX: la teoría de la relatividad, establecida por Einstein, y la teoría cuántica, a cuya formulación contribuyeron de manera notable Planck, De Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Bohr y el propio Einstein, entre otros. Estas teorías modificaron profundamente la visión que hasta entonces se tenía de la naturaleza y dieron lugar a nuevos procedimientos experimentales, técnicas de análisis, problemas y soluciones con cuyos resultados convivimos aún hoy en la vida diaria.

De entre los muchos cambios que propiciaron las cuestiones concretas que se tuvieron que abordar a la luz de esas nuevas teorías, así como las estrategias desarrolladas para resolverlas, hay uno que llama poderosamente la atención: cuando se comparan los intereses de los físicos posteriores a 1865 con los de aquellos que desarrollaron su actividad con anterioridad a esa fecha se

observa una profunda diferencia asociada con lo que podríamos denominar «especialización». De hecho, una de las consecuencias de esas revoluciones fue el abandono del humanismo científico que había caracterizado la labor realizada por los físicos (y los científicos en general) hasta mediados del siglo XIX, que abarcaba distintas ramas del saber, tratando de resolver problemas de disciplinas muy diferentes en apariencia, pero que dotaban a los investigadores de un conocimiento genérico de la naturaleza. De hecho, en muchas universidades la Física recibía el llamativo nombre de Filosofía Natural.

A partir de ese momento, los científicos se especializaron en temáticas concretas, con escasas interacciones (en el mejor de los casos) con colegas ajenos a esas temáticas. Esta característica impregnó la investigación a lo largo del siglo XX, originando equipos estancos, bastante impermeables a ideas provenientes de otros ámbitos de la propia disciplina o de otras ciencias. Afortunadamente, ya a finales de ese siglo, pero sobre todo con el nacimiento del siglo XXI, los científicos se han percatado del claro empobrecimiento que esta actitud llevaba aparejado y, en la actualidad, la interdisciplinariedad es uno de los valores que más se premian a la hora de la financiación de proyectos de investigación, siendo cada día más habituales los grupos en los que científicos de muy distintas especialidades cooperan en la consecución de objetivos comunes.

No obstante, pese a lo que acabamos de comentar, es posible encontrar ejemplos de personajes que han contradicho este paradigma. Uno de los últimos, y de los más conocidos, fue sin duda Feynman, premio Nobel de Física en 1965 por sus trabajos en Electrodinámica Cuántica y que dedicó bastante de su tiempo a abordar cuestiones de muchos otros ámbitos científicos, incluyendo la biología.

Mucho menos conocido, pero en la misma línea vital que Feynman, es el personaje que nos ocupa. Gueorgi Gamow (1904-1968) fue uno de esos «atrasados en el tiempo», otro de esos científicos *ottocentistas* tardíos que se opuso a la especialización absoluta y cuya curiosidad le llevó, para fortuna de todos, a abordar problemas de la más diversa índole.

Ruso de nacimiento, Gamow vivió la Revolución rusa, soportó las restricciones de todo tipo que la siguieron y terminó por emigrar a Estados Unidos, cambiándose el nombre por su versión anglosajona: George. Gamow es una figura que solo cabe catalogar como excepcional en la Física de la primera mitad del siglo XX.

Esa excepcionalidad la demostró ya desde muy joven, si hacemos caso de sus propias palabras. En abril de 1968, apenas cuatro meses antes de su fallecimiento, Charles Weiner, un historiador de la ciencia, le hizo una larga entrevista en la que salieron a relucir muchos detalles de su vida. En un momento de la entrevista, Weiner le preguntó a Gamow sobre las razones de su interés por la física y la astronomía, aludiendo a si se debía precisamente a sus estudios en la escuela, a lo que Gamow respondió:

> No, verá, yo iba bastante por delante. Cuando en la escuela estaban enseñando álgebra, yo estaba estudiando ecuaciones diferenciales en casa. Aprendí la teoría de la relatividad de Einstein cuando estaba aún en la escuela. Simplemente me interesó [la física].

Gamow fue fundamentalmente un físico teórico que trabajó en el área de la física nuclear, primero, y en la aplicación de esta a la astrofísica y la cosmología, más adelante. Sin embargo, sus primeros pasos como investigador en la universidad se orientaron hacia la física experimental, aunque según él mismo reconocía nunca progresó demasiado en ese campo. No obstante, su curiosidad «experimental» siempre estuvo presente, y en su autobiografía relata algunos de sus «enfrentamientos» con la experimentación científica. El primero de ellos, quizá el más curioso, le ocurrió cuando su padre le regaló, siendo aún niño, un microscopio. Impactado en aquel entonces por el dogma del sacramento de la Eucaristía (el pan y el vino después de consagrados se transforman en la carne y la sangre de Cristo), se propuso comprobarlo por sí mismo y un día, después de comulgar, conservó la hostia mojada en vino en su boca hasta que volvió a casa. Inmediatamente puso la muestra en el microscopio y la comparó con otra muestra similar previamente preparada y que no había sido objeto de consagración. Pudo constatar la similitud de ambas

muestras y cómo las dos diferían a su vez de una fina capa de piel que había cortado de la yema de uno de sus dedos. Gamow dice en su autobiografía que este episodio fue lo que le indujo a ser científico. Y sin duda hizo de él el escéptico que siempre fue.

Anterior a este episodio fue su primer contacto con la astrofísica: en 1910, subido al tejado de su casa, vio el cometa Halley. De aquella experiencia singular guardó un vívido recuerdo durante toda su vida.

Los logros científicos de Gamow fueron notables. Como ya hemos indicado, sus primeros trabajos relevantes los realizó en el marco de la física nuclear, que por aquel entonces estaba dando sus primeros pasos. Tres fueron sus principales aportaciones en este campo. En la primera explicó la desintegración α utilizando el efecto túnel (un mecanismo cuántico que no tiene paralelo en la física clásica). Es importante resaltar que este trabajo se publicó en 1928, años antes del descubrimiento del neutrón por Chadwick, fecha que muchos consideran como punto de partida de la física nuclear como disciplina independiente.

Las otras dos aportaciones tampoco fueron desdeñables: formuló el modelo de la gota líquida para el núcleo (un modelo que tuvo un impacto enorme en la descripción de la fisión nuclear) y, junto con Teller, describió las reglas de selección de las desintegraciones β que llevan su nombre.

En el ámbito de la astrofísica trabajó en los mecanismos responsables de la producción de energía en las estrellas y en problemas de evolución estelar. Y, más adelante, tras implicarse de lleno en el campo de la cosmología, fue uno de los primeros defensores de la teoría que establece que el universo tuvo un estado inicial caliente y denso, y predijo la existencia del fondo cósmico de radiación de microondas con una temperatura de unos pocos grados kelvin. Además, aplicó los conocimientos adquiridos en física nuclear para calcular la abundancia de hidrógeno y helio en el universo a partir de las reacciones nucleares ocurridas en los primeros instantes después del Big Bang.

Hacia 1954 llevó a cabo lo que él, en su autobiografía, denomina «una extravagante desviación en el campo de las ciencias biológicas». Poco después de que Crick y Watson anunciaran su

descubrimiento de la estructura de doble hélice de la molécula de ADN, indagó sobre cómo la información sobre la herencia que aparece en las cuatro bases que forman la parte relevante de la molécula se traslada a los 20 aminoácidos con los que se conforman las proteínas, las sustancias básicas de la vida.

A pesar de ser uno de los mejores conocedores de la física nuclear en su tiempo, Gamow no participó en el Proyecto Manhattan, y durante la Segunda Guerra Mundial siguió dando clase en Washington, aunque trabajó como consultor de la Armada estadounidense en cuestiones relacionadas con explosivos convencionales. Durante aquella época mantuvo cierta relación con Einstein, que también sirvió como consultor en la misma división que él. Años más tarde sí que participó en el proyecto para la fabricación de la bomba de hidrógeno que dirigieron Teller y Ullam.

Además de su actividad científica, Gamow llevó a cabo una extraordinaria labor como divulgador científico, lo que le valió en 1956 el premio Kalinga, otorgado por la Unesco. Entre sus publicaciones más populares destacan los cuatro libros que narran las aventuras y desventuras científicas del Sr. Tompkins, un empleado de banca aficionado a la física. En total su producción en el ámbito de la divulgación alcanzó una veintena de libros y una decena de artículos en la revista *Scientific American*.

Según el investigador Nelson H.F. Beebe, del Departamento de Matemáticas de la Universidad de Utah (Estados Unidos), quien ha llevado a cabo un estudio detallado de sus trabajos, Gamow produjo más de 500 entradas bibliográficas, de las que más de 200 son artículos en revistas científicas. Entre los coautores de sus artículos están Chadwick, Bloch, Landau, Bethe y Chandrasekhar, premios Nobel de Física; Rutherford y Aston, premios Nobel de Química, y Delbrück, premio Nobel de Fisiología o Medicina.

Gamow falleció en Boulder, Colorado, el 19 de agosto de 1968, después de haber sufrido varios problemas de salud. La torre que alberga el Departamento de Física de la Universidad de Colorado lleva su nombre. Y desde 1971, en esa misma universidad tiene lugar anualmente la conferencia «Memorial de George Gamow» impartida por científicos de primera fila, muchos de ellos galardonados con el premio Nobel.

Vera Rubin, una bien conocida astrónoma estadounidense que realizó su tesis doctoral con Gamow, dijo de él:

> Gamow no podía deletrear; no podía hacer cálculos aritméticos sencillos. Creo que le habría sido realmente imposible encontrar el producto de 7 por 8. Pero tenía una mente que le hacía posible entender el universo.

Gamow acaba su autobiografía con la siguiente reflexión, que no deja duda acerca de cuál fue su postura vital y científica, mostrando ese carácter multidisciplinar que le acompañó durante toda su vida y que resulta palmario en sus propias palabras:

> ¿Me gusta escribir libros sobre ciencia popular? Sí, me gusta. ¿Considero que es esa mi mayor vocación? No, no lo considero. Mi mayor interés es atacar y resolver los problemas de la naturaleza, sean estos físicos, astronómicos o biológicos. Pero para «ponerse en marcha» en la investigación científica uno necesita una inspiración, una idea. E ideas buenas y excitantes no se presentan cada día. Cuando no tengo ninguna idea nueva sobre la que trabajar, escribo un libro; cuando aparece alguna idea fructífera para la búsqueda científica, la escritura disminuye. En cualquier caso, como he dicho, he publicado en total veinte libros sobre ciencia popular, con dos más en preparación: uno nuevo sobre cosmología y la presente autobiografía. Los libros populares me valieron el premio Kalinga por la divulgación de la ciencia (concedido por la Unesco), que dio lugar a un muy interesante y agradable viaje para impartir conferencias en la India y Japón. Si uno incluye los tres tratados sobre física nuclear hacen veinticinco libros, que es suficiente para una vida. No planeo escribir ningún libro más. Una de las razones es que he escrito prácticamente sobre todo lo que conozco. Pero existe una posibilidad remota de que pueda publicar un libro de cocina o un manual sobre caza mayor.

1904 El 4 de marzo nace en Odesa (Rusia) Gueorgi Antonovich Gamow.

1922 Gamow ingresa en la Universidad de Novorossia, en Odesa, donde sigue cursos de matemáticas. Continúa su formación universitaria en la Universidad de Petrogrado.

1928 Lleva a cabo sendas estancias en las universidades de Gotinga y Copenhague como becario de investigación. Publica el artículo «Sobre la teoría cuántica de los núcleos atómicos», en el que formula la teoría de la desintegración α.

1929 Disfruta de una beca de la fundación Rockefeller en la Universidad de Cambridge, donde trabaja en el laboratorio Cavendish. En *Proceedings of the Royal Society of London* publica «Discusión sobre la estructura del núcleo atómico», donde propone el primer modelo de la gota líquida, que tuvo un gran impacto en la descripción de la fisión nuclear.

1931 Contrae matrimonio con Lyubov Vokhminzeva, de la que se divorciará en 1955. Retorna a la Universidad de Leningrado.

1932 Intenta sin éxito fugarse de la URSS en una canoa junto con su esposa. Al año siguiente asiste al Congreso Solvay en Bruselas y aprovecha la ocasión para abandonar el país.

1934 Toma posesión como profesor en la Universidad George Washington, donde ejercerá hasta 1956.

1936 Teller y Gamow publican en *The Physical Review* un trabajo titulado «Reglas de selección para la desintegración β».

1940 Adopta la nacionalidad estadounidense.

1946 Publica el artículo «Universo en expansión y el origen de los elementos», considerado por muchos como el inicio de la cosmología moderna. Dos años más tarde publica «El origen de los elementos químicos» junto con Alpher y Bethe, donde se sugiere una nueva imagen del universo más temprano.

1952 Se publica el libro de Gamow *La creación del universo*, en el que recoge todos sus artículos sobre el tema, entre ellos la teoría del Big Bang.

1954 Escribe el artículo «Síntesis de las proteínas por moléculas de ADN», una incursión en el campo de la genética.

1956 Se incorpora como profesor a la Universidad de Colorado, donde estuvo hasta su fallecimiento. La Unesco le concede el premio Kalinga por su trabajo como divulgador científico.

1958 Se casa con Barbara Perkins.

1968 Muere el 19 de agosto en Boulder, Colorado.

CAPÍTULO 1

Un joven ruso en Gotinga

Gamow nació en la Rusia zarista, progresó en sus estudios primarios, a pesar de la Revolución y de la guerra civil, y también lo hizo en la universidad, superando las restricciones que siguieron al advenimiento del régimen marxista. Desde el principio de su carrera estuvo interesado en la teoría cuántica, que estudió en la Universidad de Leningrado. En 1928 visitó el Instituto de Física Teórica de Gotinga, donde conoció a los físicos más preeminentes de la época, a los que encandiló con su brillantez.

Tras la Revolución de 1917, Odesa, la ciudad donde había nacido Gamow, se vio acuciada por sucesivas ocupaciones militares (nacionalistas ucranianos, ingleses, franceses, el ejército Blanco), hasta que en 1920 el Ejército Rojo tomó la ciudad definitivamente y la anexionó a la República Socialista Soviética de Ucrania, que más tarde formaría parte de la URSS. Fue esa una época de penurias: hambruna, cólera, tifus, entre otras muchas, pero una de las que más agobiaba a los ciudadanos era la falta de agua que, recurrentemente, se hacía notar en la ciudad. Al estar situada en una zona relativamente seca, el abastecimiento se hacía desde el río Dniéster, distante algunos kilómetros, mediante estaciones que bombeaban el agua hasta los depósitos de almacenamiento. Por diversas razones, de las que la más relevante era el retraso en la recepción del carbón que permitía operar las bombas, el suministro se interrumpía más de lo deseado y era necesario acudir muchos días a las fuentes públicas, guardar la correspondiente cola y acarrear de vuelta a casa las garrafas necesarias para beber y cocinar.

En una ocasión, esperando su turno, un marinero inglés se dirigió a Gamow preguntándole por la razón de la larga fila. Cuando le contestó que iba a recoger agua, el marinero le acercó a su barco, atracado a unos pocos metros de allí, y con una manguera le rellenó los recipientes en pocos segundos. Ni que decir tiene que todos los que estaban en la cola se acercaron inmediatamente

al marinero para que también les llenara a ellos sus cubos y botellas, lo que este hizo amablemente. De vuelta a casa, Gamow se llevó la desagradable sorpresa de que el agua que había acarreado era agua salada, probablemente extraída de la propia dársena. Como él mismo confesó más adelante, en ese instante comenzó a apreciar el «curioso» sentido del humor inglés. Y puede que ello incidiera en el suyo propio, un gracejo socarrón que mantuvo a lo largo de su vida.

PRIMEROS AÑOS

Gueorgi Antonovich Gamow nació el 4 de marzo de 1904 en Odesa, ciudad portuaria en la costa noroeste del mar Negro, fundada por Catalina la Grande en 1794. Aleksandra, su madre, fue profesora de historia y geografía en una escuela femenina privada. De cinco hermanos, ella era la única hija del arzobispo metropolitano Arseni Lebedinzev, que llegó a ser sacerdote jefe de la catedral de Odesa y administrador religioso de Novorossia (Nueva Rusia, nombre utilizado para denominar una región al norte del mar Negro conquistada por el Imperio ruso a finales del siglo XVIII). Sus cuatro hermanos varones eran: Vitia (militar), Volodia (que alcanzó la presidencia de la Corte de Justicia de Odesa), Sasha (profesor de latín y griego) y Senia (químico).

Por su parte, el padre de Gamow, Anton, era hijo de Mikhail, un coronel del ejército que había sido comandante del distrito militar de Kishinev (actualmente Chisináu, la capital de Moldavia). Tuvo tres hermanos, todos ellos militares, y una hermana. Estudió en la Universidad de Odesa, y fue profesor de lengua y literatura rusas en una escuela privada para chicos en la misma ciudad. En su primer año como profesor tuvo como alumno a Lev Davídovich Bronstein, que con el paso del tiempo se haría famoso con el nombre de León Trotsky, uno de los líderes de la Revolución de Octubre de 1917.

El nacimiento de Gueorgi se complicó y fue preciso practicarle una cesárea a la madre. Ante la complejidad del parto, los médicos habían decidido primar la vida de la madre en detrimento

de la del niño, pero una vecina sabía que un reconocido cirujano moscovita estaba pasando unas semanas de vacaciones en una localidad próxima, de modo que fue a por él y consiguió traerlo hasta la casa de los Gamow. El alumbramiento vino a acaecer en la mesa de la biblioteca de la casa, hecho sobre el que Gueorgi siempre bromeó en el sentido de que debió de ser determinante para que él escribiera tantos libros a lo largo de su vida.

Su madre, que a raíz de las dificultades médicas del parto no pudo tener más hijos, murió cuando Gueorgi tenía nueve años, justo antes de la Primera Guerra Mundial. Hasta ese momento sus padres se habían encargado de su formación. Su madre le había dado clases de francés y además había contado con la participación de dos institutrices: una que se ocupó de su educación genérica y otra que le enseñó alemán. Tras la muerte de su madre empezó a asistir a la escuela en la que enseñaba su padre.

LA UNIVERSIDAD DE NOVOROSSIA

La Revolución rusa de 1917 marcó el principio de un período de agitación que produjo un sinfín de pequeños conflictos cotidianos que hicieron complicada la vida diaria: escasez de alimentos, cierre intermitente de las escuelas, etcétera. A pesar de ello, Gueorgi consiguió completar sus estudios y graduarse en 1920, para casi de inmediato matricularse en la Universidad de Novorossia, en la misma Odesa, a poca distancia de su casa. Como su interés se había decantado ya hacia la física, eligió los cursos de la Facultad de Física y Matemáticas. Pero se encontró con una curiosa anomalía: mientras que las clases de matemáticas se impartían con normalidad por parte de los profesores Shchatunovski (álgebra superior), Kagan (geometría multidimensional) y Rabinovich (teoría de la relatividad), los cursos de física estaban suspendidos. El profesor Kasterin, jefe del Departamento de Física, se negaba a impartir sus clases porque no disponía de un asistente para realizar las demostraciones experimentales ni de los aparatos necesarios para llevarlas a cabo.

Dada la situación, se involucró de lleno en el estudio de las matemáticas. De las muchas anécdotas ocurridas en aquellos momentos en los que la universidad trataba de retomar su actividad normal, es interesante señalar dos de ellas, que el propio Gamow relata en su autobiografía. La primera corresponde al profesor Shchatunovski. Un día en clase preguntó a un estudiante: «Si usted multiplica 5 taxistas por 3 palmatorias, ¿qué obtiene?». Al parecer el estudiante fue incapaz de responder a tan curiosa pregunta por lo que el profesor respondió: «Fácil: 15 taxistas-palmatorias». Gueorgi cuenta cómo este episodio le dio la primera idea acerca del análisis dimensional, una herramienta fundamental en física.

El curso de Kagan se impartía por la tarde y la mayoría de los días seguían las clases casi a oscuras, debido a que las restriccio-

EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES Y EL ANÁLISIS DIMENSIONAL

El Sistema Internacional de Unidades incluye 7 unidades básicas, que son las que se muestran en la tabla siguiente:

	Unidad		
Cantidad	**Nombre**	**Símbolo**	**Dimensión**
Longitud	metro	m	L
Masa	kilogramo	kg	M
Tiempo	segundo	s	T
Corriente eléctrica	amperio	A	I
Temperatura termodinámica	kelvin	K	Q
Cantidad de sustancia	mol	mol	N
Intensidad luminosa	candela	cd	J

Cada unidad básica corresponde a una cantidad o magnitud básica. Todas las demás magnitudes y sus correspondientes unidades son derivadas. Por ejemplo, la unidad de velocidad es 1 m/s (que no tiene un nombre específico). La unidad de la magnitud «fuerza» es el newton, cuyo símbolo es N, que vale $1\ N = 1\ kg \cdot m/s^2$. Todas las magnitudes básicas tienen asociada una dimensión, representada con un símbolo que se muestra también en la tabla anterior. Si d es la longitud de la pata de una mesa, su dimensión es: $[d] = L$. Y si T es el

nes de combustible limitaban la disponibilidad de electricidad. De todas formas, como justificaba Kagan, «una figura multidimensional no puede dibujarse en la pizarra». Cuando acababan recorrían los pasillos a la luz de las cerillas y, finalmente, terminaban saltando la verja que rodeaba la facultad, ya que los bedeles hacía tiempo que habían terminado su trabajo. Como quiera que el grupo de estudiantes, a pesar de todo, acabó obteniendo buenas notas, Kagan sentenció: «Ello prueba que la imaginación es muy superior a la iluminación».

Pero Gueorgi quería estudiar física y, más concretamente, física teórica. En 1922 decidió marcharse a la Universidad de Petrogrado. Tras la Revolución, su padre había tenido que reincorporarse a su escuela, pero no como profesor, sino como

período de oscilación de un péndulo, su dimensión es $[T]=\mathrm{T}$. Para referirnos a la dimensión de una magnitud la escribimos entre corchetes. La dimensión de una magnitud derivada se expresa en función de las dimensiones de las magnitudes básicas correspondientes. Por ejemplo, si v es la velocidad de un automóvil (que calculamos como el cociente entre el espacio recorrido y el tiempo transcurrido), tendremos: $[v]=\mathrm{LT}^{-1}$. El análisis dimensional es el análisis de las dimensiones de las magnitudes involucradas en las ecuaciones de la física (y, en general, las de cualquier ámbito científico), y constituye una herramienta fundamental. La razón de ello es que todas esas ecuaciones deben ser homogéneas, es decir, que las dimensiones de las magnitudes que figuran a izquierda y derecha del signo igual de la ecuación deben ser las mismas. El potencial del análisis dimensional estriba en que permite, en algunos casos, ir más allá de la comprobación de la corrección de la ecuación (lo que es fundamental) y encontrar la dependencia correcta entre las magnitudes involucradas. Veamos un ejemplo: queremos encontrar la expresión que proporciona la aceleración centrípeta de un móvil que recorre una trayectoria circular de radio r con una velocidad de magnitud constante v. Dado que las magnitudes involucradas son esas dos, r y v, podemos escribir, de manera muy general, y a excepción de una constante sin dimensiones, que la aceleración viene dada por: $a=r^m v^n$. Como la ecuación debe ser homogénea, $[a]=[r^m v^n]$ y, dado que la dimensión de la aceleración es LT^{-2}, tendremos:

$$\mathrm{LT}^{-2}=(\mathrm{L})^m (\mathrm{LT}^{-1})^n=(\mathrm{L})^{m+n} (\mathrm{T})^{-n}$$

y, por tanto, $n=2$ y $m=-1$. Es decir, que $a=v^2/r$, que es la expresión correcta.

bedel. Había perdido su pensión y el nuevo gobierno exigía un trabajo para poder cobrar un sueldo que, por lo demás, era exiguo. La buena situación económica de la familia en la época zarista había cambiado drásticamente y Anton Gamow tuvo que vender algunos objetos de plata que aún quedaban en la casa para poder pagar a su hijo el billete de tren a Petrogrado.

ESTUDIOS EN LA UNIVERSIDAD DE PETROGRADO

Cuando llegó a Petrogrado en julio de 1922, se inscribió en la Facultad de Física y Matemáticas. Con el fin de sufragar los gastos de su estancia (la matrícula en la universidad era gratuita), buscó una ocupación que le permitiera asistir a las clases. Un antiguo colega de su padre en la escuela de Odesa, el profesor Obolenski, que entonces enseñaba meteorología en el Instituto de Ciencias Forestales, le ofreció el puesto de encargado de la estación meteorológica. Su labor consistía en anotar los valores de temperatura, presión barométrica, velocidad y dirección del viento, etcétera, tres veces al día (a las 6 de la mañana, a mediodía y a las 6 de la tarde). El trabajo no era muy exigente y podía simultanearlo con sus estudios.

Sin embargo, Gamow, decidido como estaba a especializarse en física teórica, no tardó en litigar con Obolenski, que abogaba por hacer de él un buen meteorólogo, y se despidió. Por fortuna, casi inmediatamente obtuvo un puesto (como sustituto temporal) de profesor ayudante de Física en la Escuela de Artillería del Ejército. Las reglas de la institución imponían que todos sus miembros adquirieran la categoría militar correspondiente al salario que recibían por su trabajo, y Gueorgi devino *comandante* del Ejército Rojo, con derecho a (y deber de) lucir el correspondiente uniforme cuando la ocasión así lo requiriera. Desafortunadamente no se ha conservado ninguna instantánea de Gamow vestido de tal guisa.

Simultaneando su trabajo de profesor en la Escuela de Artillería con las clases de la universidad, Gamow completó en 1925 su grado con calificaciones suficientes para convertirse en aspirante para el doctorado. Para ser nombrado aspirante debía contar con

un profesor que lo propusiera para tal puesto y Gueorgi se dirigió al profesor Rozhdestvenski, director del Instituto de Física. Como había completado los estudios en tres años (en lugar de los cuatro que estaban, en principio, estipulados) y el número de puestos de aspirante era limitado, Rozhdestvenski le recomendó esperar un año para presentar su candidatura al doctorado, evitando así competir con los estudiantes más experimentados. Gamow no tenía problema para esperar, pero su puesto en el ejército estaba cercano a terminar y necesitaba un trabajo para mantenerse. Rozhdestvenski le ofreció entonces un puesto como investigador en el Instituto de Óptica que acababa de ser creado por el Gobierno soviético y que él también dirigía. A la vez le sugirió empezar desde ese momento con su tesis doctoral.

Gueorgi se vio así metido de lleno en una actividad netamente experimental. En alguna ocasión bromeó acerca de las razones para haber elegido esta línea de trabajo tan alejada de la física teórica: al parecer los estudiantes que trabajaban en física experimental tenían su propia habitación en el instituto, en la que disponían de sitio para colgar sus abrigos; los teóricos tenían que dejarlos en la entrada del instituto.

El año de espera para optar al doctorado tuvo otra sorpresa para Gueorgi. El Comisariado de Educación del nuevo Gobierno había modificado los planes de estudio de todas las especialidades universitarias incluyendo dos nuevos cursos: «Historia de la revolución mundial» y «Materialismo dialéctico». Gamow, que seguía siendo oficialmente un estudiante, tuvo que hacer los dos exámenes.

En el Instituto de Óptica, Gueorgi desarrolló un trabajo técnico que consistía en tomar grandes piezas de vidrio y seleccionar aquellas secciones que tuvieran la adecuada homogeneidad para poder emplearlas en la construcción de instrumentos ópticos de precisión. En ese tipo de vidrio las impurezas se presentaban como delgados capilares con densidad ligeramente diferente de la del propio vidrio, pero no podían verse a simple vista debido a que las piezas de vidrio eran rugosas e irregulares. Gamow ideó una técnica que consistía en sumergir las piezas en un recipiente lleno de un líquido con el mismo índice de refracción que el vidrio.

En tales circunstancias, la luz no se refracta en la interfaz vidrio-líquido y las piezas resultaban prácticamente invisibles, mientras que las impurezas capilares aparecían nítidamente y era posible cortar las secciones útiles.

Como trabajo de investigación, Rozhdestvenski le propuso estudiar los cambios anómalos que se producían en el índice de refracción de los gases cuando se usaba la luz con longitudes de onda cercanas a las de las líneas de absorción del elemento que formaba el correspondiente gas. Esto le llevó a manejarse con interferómetros y otros instrumentos ópticos de precisión y con lámparas de vapor de potasio (el elemento que empezó a estudiar), y a tratar de fotografiar las figuras de interferencia que se producían. Nunca fue capaz de progresar en dicho trabajo y, finalmente, Rozhdestvenski se lo asignó a otro estudiante, Prokofiew, que completó el estudio y publicó en 1927, en la revista alemana *Zeitschrift für Physik*, un artículo (en el que puso a Gamow como coautor) que tenía por título «Dispersión anómala de las líneas de la serie principal del potasio (la razón de las constantes de dispersión de los dobletes rojo y violeta)».

LOS TRES MOSQUETEROS

No fue este, sin embargo, el primer trabajo publicado del que Gueorgi fue autor. Un año antes había aparecido en la misma revista el artículo titulado «Sobre la teoría ondulatoria de la materia», de Gamow e Ivanenko. En él estudiaron la posibilidad de considerar la función de onda, introducida por Erwin Schrödinger para describir la dinámica de un sistema cuántico, como una quinta dimensión que se añadiría a las cuatro dimensiones del sistema relativista de Minkowski (las tres dimensiones espaciales más el tiempo). Sin embargo, esta hipótesis no tuvo ni continuidad ni resultados adicionales.

Pero el artículo sí que tuvo una consecuencia en relación a la ortografía del apellido Gamow. En caracteres cirílicos es *Гáмов*, que debería haber sido transcrito como Gamov. Sin embargo, al







FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Foto de Gamow tomada en Odesa en 1907, cuando contaba tan solo tres años de edad.

FOTO SUPERIOR DERECHA:
Gamow en la época en que estudiaba en Petrogrado, ciudad que luego cambiaría el nombre al de Leningrado tras la muerte de Lenin en 1924. Allí conoció a dos de sus grandes amigos: Dmitri Ivanenko y Lev Landau. Este grupo de amigos era conocido como «Los tres mosqueteros».

FOTO INFERIOR:
En 1922, Gamow se trasladó a la ciudad de Petrogrado, uno de los mayores centros científicos de Rusia, para estudiar física teórica en la Facultad de Física y Matemáticas, aunque para ello tuvo que compaginar los estudios con diversos trabajos. En la imagen, la Biblioteca Nacional de Rusia en Petrogrado hacia 1920.

DMITRI DMITRIEVICH IVANENKO (1904-1994)



Ivanenko, a la derecha, junto al científico ruso Vasily Fursov en 1975.

Dmitri Ivanenko fue un físico ruso que realizó importantes contribuciones a la física nuclear, la teoría de campos y la teoría de la gravitación. Nacido en 1904 en Poltava (Ucrania), ingresó en la Universidad de Leningrado en 1924, donde se graduó tres años más tarde. Entre 1927 y 1930 trabajó en el Instituto de Física y Matemáticas de la Academia de Ciencias de la URSS, donde colaboró con Landau, Fock y Ambartsumian. En 1932 propuso por primera vez la posibilidad de que el núcleo atómico estuviera compuesto por protones y neutrones. Y poco tiempo después, en un trabajo conjunto con Gapon, formuló la hipótesis de la estructura de capas del núcleo. Junto con Tamm, en 1934, propuso que la interacción entre partículas podría llevarse a cabo a través del intercambio de otras partículas con masa, trabajo en el que Yukawa (premio Nobel de Física en 1949) se basó para establecer su teoría del intercambio mesónico de la interacción nuclear.

Deportación a Siberia

En 1935, con motivo de la purga que Stalin puso en marcha tras el asesinato de Kirov, fue arrestado y deportado a Tomsk, en Siberia, en cuya universidad ejerció como profesor hasta 1938. En los años siguientes estuvo en la Universidad Estatal de los Urales, en Ekaterimburgo, y en la de Kiev, y a partir de 1943 recaló en la Universidad Estatal Lomonosov, en Moscú. En 1944, junto a Pomeranchuk, predijo la radiación sincrotrón como efecto asociado al movimiento de electrones relativistas en campos magnéticos. En los años cincuenta colaboró con Heisenberg en el desarrollo de una teoría de campos no-lineal sobre la base de algunos trabajos suyos publicados en 1938 en los que propuso una generalización de la ecuación de Dirac. En colaboración con varios científicos, abordó la teoría de los hipernúcleos (1956) y propuso la hipótesis de las estrellas de quarks (1965). En 1983, en un trabajo conjunto con Sardanashvily, extendió la teoría de Yang-Mills de las interacciones fundamentales para explicar la gravitación. Falleció el 30 de diciembre de 1994 en Moscú.

ser alemana la revista en la que se publicó el trabajo, Gueorgi sustituyó la «v» final (que en alemán suena como «f») por la «w» germana, que sí responde al sonido original correcto. Y a partir de ahí mantuvo la grafía Gamow de su apellido.

Ivanenko fue otro gran físico del siglo XX. A partir de 1924, Gueorgi y él coincidieron en la Universidad de Leningrado (Lenin había muerto el 24 de enero de ese año y la ciudad había cambiado de nombre de Petrogrado a Leningrado) con otra figura preeminente de la física: Landau. Los tres formaron un grupo de amigos, conocido como «Los tres mosqueteros», que además de divertirse jugando al tenis, nadando o yendo al cine a ver películas de Hollywood, manifestaron un profundo interés en los avances de la física teórica que en esos momentos estaban produciéndose y mantenían reuniones casi diarias en las que discutían sobre ellos.

Tras abandonar su trabajo experimental en óptica, Gamow había pasado a estar tutelado por el profesor Krutkov, que le propuso como trabajo de tesis el «estudio de la invariancia adiabática del péndulo cuantizado con amplitudes finitas». En palabras del propio Gueorgi en su autobiografía: «Por decirlo muy suavemente, el proyecto era extremadamente aburrido y, por mucho que lo intentaba, no podía mostrar ningún entusiasmo por él». El argumento del trabajo se enmarcaba de lleno en la «vieja» teoría cuántica y los nuevos vientos de la física teórica eran, sin duda, mucho más atractivos.

Corría el año 1925. El modelo atómico de Bohr, que había permitido desde su propuesta en 1913 notables avances en la física atómica y la física cuántica, había empezado a presentar dificultades a la luz de la nueva y más detallada información experimental. Surgieron entonces dos alternativas aparentemente diferentes pero que con el paso del tiempo se comprobó que proporcionaban los mismos resultados. La primera era la mecánica matricial, propuesta por Werner Heisenberg (1901-1976) (físico alemán que a la sazón tenía solo veinticuatro años). La segunda era la mecánica ondulatoria, propuesta originalmente por el francés Louis-Victor de Broglie (1892-1987) y perfeccionada por el austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961). Ambas teorías conte-

LEV DAVIDOVICH LANDAU (1908-1968)



Landau fue un físico soviético nacido en Baku (Azerbaiyán) el 22 de enero de 1908. Su padre era ingeniero industrial y su madre médico. A la edad de catorce años ingresó en la Universidad Estatal de Bakú, donde siguió cursos de física, matemáticas y química. En 1924 se trasladó a la Universidad de Leningrado, donde se graduó en 1927. A partir de 1929 disfrutó de sendas becas del Gobierno soviético y de la Fundación Rockefeller para viajar a Gotinga y Leipzig y, más adelante, a Copenhague, donde trabajó con Bohr. Entre 1932 y 1937 fue director del Departamento de Física Teórica del Instituto Politécnico de Járkov (Ucrania). Fue allí donde empezó a escribir, junto con uno de sus primeros estudiantes, Lifshitz, su célebre *Curso de Física Teórica*, una monumental obra en 10 volúmenes. Aunque fue investigado durante la purga estalinista, consiguió evitar su procesamiento y fue nombrado director de la División Teórica del Instituto para los Problemas de la Física, fundado en 1934 por el profesor Kapitsa. Landau lideró el grupo de científicos que participaron en el desarrollo de las bombas nuclear y termonuclear soviéticas, por lo que recibió el premio Stalin en 1949 y 1953, y se le concedió el título de Héroe del Trabajo Socialista un año más tarde.

Aportaciones destacadas

Los logros científicos de Landau son notables. Entre ellos cabe destacar los siguientes: formuló el método de la matriz densidad en mecánica cuántica (simultánea e independientemente de Von Neumann), desarrolló las teorías cuánticas del diamagnetismo, de la superfluidez, de las transiciones de fase de segundo orden, de la superconductividad (junto con Vitaly Ginzburg, premio Nobel en 2003) y del líquido de Fermi. Estudió distintos fenómenos que ocurren en los plasmas, uno de los cuales, el *amortiguamiento de Landau*, lleva su nombre. En teoría cuántica de campos, la energía a la que la constante de acoplamiento que mide la intensidad de la interacción se hace infinita se denomina *polo de Landau*. En enero de 1962 sufrió un accidente de tráfico y estuvo dos meses en coma. Ese mismo año fue galardonado con el premio Nobel por sus «teorías pioneras para la materia condensada, especialmente el helio líquido». Las complicaciones derivadas del accidente acabaron con su vida el 1 de abril de 1968.

nían la misma física y se diferenciaban únicamente en el lenguaje matemático utilizado para expresarla.

Concentrado junto con Ivanenko y Landau en las nuevas teorías cuánticas, Gueorgi había dejado completamente de lado su trabajo de tesis. La falta total de progresos en la misma le acarreó una llamada de atención y la amenaza de no conseguir la prórroga para el tercer año de su posición como aspirante. Sin embargo, gracias a un profesor jubilado, Khvolson, su vida dio un vuelco inesperado. Este profesor propuso a la universidad que Gamow fuera enviado, en el verano de 1928, a Gotinga, cuya universidad era uno de los centros donde se estaba desarrollando la teoría cuántica. La propuesta fue secundada por Krutkov y otros profesores y Gamow viajó a Alemania en junio de aquel año.

GOTINGA

Tras cruzar el Báltico en barco desde Leningrado a Swinemünde (hoy Świnoujście, el mayor puerto marítimo de Polonia), viajó en tren hasta Gotinga y el mismo día de su llegada asistió a una fiesta que el director del Instituto de Física Teórica de la universidad había organizado para los profesores y estudiantes de doctorado. El director no era otro que el profesor Born (1882-1970), que sería galardonado con el premio Nobel de Física en 1954 por sus investigaciones fundamentales sobre la mecánica cuántica y, especialmente, por su interpretación estadística acerca de la función de ondas.

En los tres años anteriores, en los que la nueva teoría cuántica se había desarrollado, Gotinga había sido un polo de atracción y destacados físicos, como Heisenberg, Wigner, Dirac, Pauli, Fermi, Weisskopf, etc., fueron profesores o visitantes más o menos asiduos del instituto. La situación entonces en Gotinga era de una animación casi frenética, con muchos físicos involucrados en el desarrollo de la mecánica cuántica y la descripción de la dinámica de átomos y moléculas, que eran los sistemas físicos en los que desde un principio la teoría había sido aplicada con mejores resultados.

A Gamow, sin embargo, las aglomeraciones le incomodaban. Además, las aplicaciones habían alcanzado un nivel de desarrollo matemático relativamente complicado, algo que tampoco le hacía gracia. En este sentido, en su autobiografía él relata una anécdota ocurrida con Shchatunovski, su profesor de álgebra en Odesa. En una ocasión el profesor había cometido un error aritmético en una operación hecha en la pizarra y un compañero de Gueorgi se lo hizo notar. Shchatunovski le respondió bramando: «No es labor de los matemáticos hacer operaciones aritméticas correctas: eso

NOMENCLATURA NUCLEAR Y RADIACTIVIDAD

El núcleo atómico es la agrupación de protones y neutrones que contiene la mayor parte de la masa de un átomo y alrededor del cual orbitan los electrones atómicos. Se simboliza como ${}^{A}_{Z}X_{N}$, donde Z es el número atómico o número de protones, N es el número de neutrones y $A=Z+N$ es el número másico. X representa el símbolo del elemento químico del átomo neutro en el que se encuentra el núcleo en cuestión. Todos los núcleos que tienen el mismo Z y distinto N se denominan isótopos, ya que todos ellos corresponden al mismo átomo de la tabla periódica. Como la información que da el número atómico Z y el símbolo del elemento X es redundante, se suele simplificar la notación utilizando ${}^{A}X$, y el número de neutrones viene dado por $N=A-Z$. Un radionúcleo es un núcleo que de manera espontánea emite partículas y/o radiación, transformándose en otro núcleo o pasando a otro estado de él mismo. Se denomina *radiactividad* a esa propiedad de los radionúcleos; engloba las desintegraciones α y β, la desexcitación γ, la fisión y otros procesos poco frecuentes. En la primera, un núcleo emite una partícula α, que es un núcleo de ${}^{4}He$:

$${}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y_{N-2} + {}^{4}_{2}He_{2}.$$

La desintegración β incluye tres procesos, β^{+}, β^{-} y la captura electrónica, cuyas reacciones respectivas son:

$${}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y_{N-1} + e^{-} + \bar{\nu},$$

$${}^{A}_{Z}Y_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}X_{N+1} + e^{+} + \nu,$$

$${}^{A}_{Z}Y_{N} + e^{-} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}X_{N+1} + \nu.$$

En la primera, un neutrón del núcleo se transforma en un protón y se emiten un electrón (e^{-}) y un antineutrino ($\bar{\nu}$). En la segunda, es un protón el que se

es trabajo de contables». Al parecer ese comentario fue interiorizado por Gamow, que confesaba que nunca se sorprendía cuando él mismo al multiplicar 7 por 8 obtenía 45.

Sea como fuere, decidió buscar un campo de aplicación de la mecánica cuántica que estuviera aún en sus inicios y encontró un filón que le permitió establecer algunos de sus más notables logros científicos. Ese campo no fue otro que el de la física nuclear. En aquel momento, el conocimiento que se tenía del núcleo atómico era muy parcial. Hoy día sabemos que está constituido,

transforma en un neutrón, emitiéndose un positrón (e^+) y un neutrino (ν). En la última, el núcleo captura un electrón del átomo en el que se encuentra, transformándose uno de sus protones en un neutrón y emitiéndose un neutrino. La ecuación de la desexcitación γ es la siguiente:

$$^{A}_{Z}X^{*}_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z}X_{N} + \gamma.$$

En este caso, un núcleo que está excitado a causa de algún proceso nuclear previo se desexcita a algún estado de energía menor emitiendo radiación γ (fotones). Por último, la fisión, que es el proceso básico en la producción de energía nuclear hoy día, conlleva que un núcleo se divide en dos, cada uno con un número másico del orden de la mitad del valor de A del núcleo que se fisiona y se emiten neutrones y radiación γ. Todos los radionúcleos tienen un período de semidesintegración característico. Este período es el tiempo que tarda una muestra radiactiva en reducir a la mitad el número de núcleos radiactivos que contiene. Se suele representar con el símbolo $t_{1/2}$. Relacionada con él tenemos la constante de desintegración radiactiva:

$$\lambda = \frac{0{,}639}{t_{1/2}}.$$

Por último, es importante señalar que la unidad de medida de energía en física nuclear es el electronvoltio (eV) y sus múltiplos. Un eV es la energía que adquiere un electrón cuando es acelerado por una diferencia de potencial de 1 V y equivale a $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ J; 1 keV (kiloelectronvoltio) y 1 MeV (megaelectronvoltio) son mil y un millón de eV, respectivamente. Para medir las distancias se utiliza un submúltiplo del metro, el femtómetro (1 fm = 10^{-15} m), que es la milbillonésima parte de un metro.

esencialmente, por protones y neutrones. Los primeros tienen carga positiva $+e$, igual en magnitud a la del electrón, mientras que los segundos son neutros. Un sistema como ese sería obviamente inestable, ya que los protones se repelerían unos a otros. Sin embargo, los nucleones (que es como se denominan los constituyentes del núcleo, protones o neutrones indistintamente) interactúan entre sí con una fuerza (la denominada *fuerza nuclear*) que tiene un carácter fundamentalmente atractivo, permitiendo así que existan núcleos estables. Pero en 1928 el neutrón no se había descubierto aún; de hecho no fue hasta 1932 cuando el físico inglés James Chadwick (1891-1974) lo identificó, descubrimiento que le valió el premio Nobel en 1935. Como entonces las únicas partículas conocidas eran las partículas α, los protones y los electrones, los modelos nucleares incluían el número adecuado de ellas para que las cargas y masas de los núcleos tuvieran los valores que experimentalmente se habían determinado. Esos modelos, sin embargo, presentaban dificultades a la hora de explicar algunos de los resultados que arrojaban los experimentos.

PARTÍCULAS α, LA LEY DE GEIGER-NUTTALL Y EL EXPERIMENTO DE RUTHERFORD

El físico neozelandés Ernest Rutherford (1871-1937) había descubierto las partículas α a finales del siglo XIX en Cambridge. En los procesos de desintegración α, esas partículas son emitidas por muchos materiales radiactivos compuestos principalmente por elementos pesados como el uranio, el torio o el radio. En 1909, Rutherford y uno de sus estudiantes, T. Royds, demostraron que las partículas α eran núcleos de helio con una carga positiva de magnitud $2e$ y una masa igual a 4 veces la del protón, aproximadamente.

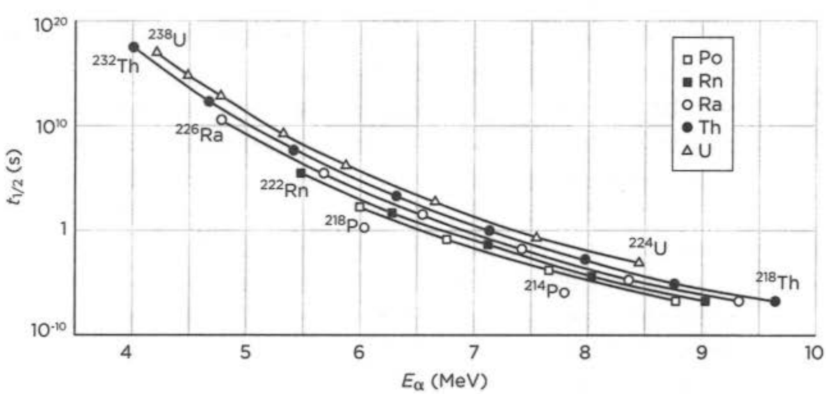
Uno de los resultados más interesantes acerca de la desintegración α es una ley empírica que fue propuesta por el físico alemán Johannes Wilhelm Geiger (1882-1945) y el inglés John Mitchell Nuttall (1890-1958) en 1911, el mismo año en el que Rutherford lanzó la hipótesis de la existencia del núcleo atómico de acuerdo

con los resultados experimentales que habían obtenido dos años antes el propio Geiger y Marsden, entonces un estudiante de grado inglés. Esta ley de Geiger-Nuttall establece que cuanto mayor es el período de semidesintegración del radionúcleo que emite la partícula α, menor es su energía y viceversa. En este contexto, lo realmente notable son los valores numéricos concretos. Así, nos encontramos, por ejemplo, con el núcleo de ^{232}Th, que emite partículas α de 4,01 MeV de energía y tiene un período de semidesintegración $t_{1/2} = 14\,000$ millones de años, mientras que para otro isótopo del torio, el ^{218}Th, $t_{1/2} = 0{,}1$ millonésimas de segundo y las partículas α que emite tienen 9,67 MeV de energía. Es decir, que un factor aproximadamente 2 en la energía supone un factor 10^{24} en el período de semidesintegración. Ello se debe esencialmente a que la dependencia entre la energía de las partículas α emitidas y el período de semidesintegración del núcleo radiactivo correspondiente es de tipo «exponencial decreciente», de forma que si representamos el logaritmo decimal de $t_{1/2}$ frente a la energía de la partícula α emitida, los datos experimentales siguen líneas suaves decrecientes, aproximadamente rectas.

En la figura 1 podemos ver la sistemática correspondiente a varios isótopos de Po, Rn, Ra, Th y U, todos ellos con un número par de protones y neutrones.

Período de semidesintegración de varios isótopos radiactivos α en función de la energía de las partículas α emitidas. Se observa cómo las curvas correspondientes a cada elemento presentan una dependencia muy suave.

FIG. 1



Como hemos dicho antes, Gamow buscaba un primer problema de física nuclear que fuera suficientemente atractivo y no tardó mucho tiempo en encontrarlo y resolverlo. A los pocos días de su llegada a Gotinga leyó en la biblioteca un artículo de Rutherford, publicado el año anterior, en el que describía los resultados experimentales obtenidos al bombardear muestras de materiales con partículas α. Rutherford había lanzado partículas α emitidas por el núcleo radiactivo RaC' (hoy día conocido como el isótopo ^{214}Po) contra uranio natural, que está formado en más del 99% por átomos cuyo núcleo es ^{238}U. Como las partículas α están cargadas positivamente, al igual que los núcleos atómicos, aquellas son repelidas por estos cuando se aproximan a ellos. Años antes Rutherford había establecido que el proceso de interacción que se ponía en juego cuando los núcleos atómicos eran bombardeados con partículas cargadas se podía describir con mucha precisión sin más que utilizar la ley de Coulomb. Pues bien, en el caso concreto del experimento del que hablamos, Rutherford comprobó que su fórmula seguía siendo válida para las partículas α emitidas por el ^{214}Po, que tienen una energía de 7,88 MeV. De hecho, un cálculo sencillo indicaba que esas partículas α llegaban a aproximarse a una distancia de unos 35 fm del núcleo blanco y posteriormente eran dispersadas sin producir ningún efecto en el mismo.

Para el científico neozelandés este resultado era contradictorio con el hecho de que el propio ^{238}U es también un isótopo radiactivo que emite partículas α de 4,27 MeV de energía. De nuevo, un cálculo similar al mencionado antes permitía demostrar que bastaba que esas partículas α partieran de una posición distante unos 60 fm del centro del núcleo para describir las características de las partículas emitidas observadas en el experimento. ¿Cómo podía ser que partículas α de 7,88 MeV no pudieran superar la repulsión electrostática de los núcleos de ^{238}U después de acercarse tanto a ellos y, sin embargo, ese núcleo radiactivo emitiera partículas α de mucha menos energía desde una distancia apreciablemente mayor?

Rutherford había encontrado la solución del rompecabezas en su modelo «de satélites» del núcleo, que le había permitido

en los años anteriores explicar muchas reacciones nucleares que había estudiado junto con sus colaboradores en el famoso laboratorio Cavendish de Cambridge.

> «Al hallar cómo está construido el núcleo de los átomos encontramos uno de los más grandes secretos que existen, si exceptuamos el de la vida.»
>
> — Ernest Rutherford.

En el caso que nos ocupa, Rutherford suponía que el ^{238}U estaba formado por un núcleo cargado positivamente alrededor del cual orbitaban, a una distancia de 60-70 fm, unas cuantas partículas α, y cada una de ellas incluía dos electrones; estaban, por tanto, neutralizadas. En el proceso de desintegración, una de esas partículas α satélite perdía sus dos electrones, que eran atraídos y absorbidos por el núcleo positivo, mientras que la partícula α, ahora ya cargada positivamente, era repelida por el propio núcleo, adquiriendo la energía con la que era observada en el experimento. Por el contrario, las partículas α del ^{214}Po con las que el blanco de uranio era bombardeado atravesaban la nube de partículas α satélite neutras sin sufrir ningún efecto, aproximándose al núcleo hasta la distancia antes mencionada para ser entonces repelidas.

Rutherford había publicado esta hipótesis en 1927 en un artículo en la revista *Philosophical Magazine* titulado «Estructura del átomo radiactivo y origen de los rayos α», que fue precisamente el que tanto llamó la atención de Gueorgi.

LA TEORÍA DE LA DESINTEGRACIÓN α

En su autobiografía Gamow hace al respecto un comentario reseñable: «Antes de cerrar la revista ya sabía yo qué pasaba en este caso». Cierto o no, Gamow publicó en la revista alemana *Zeitschrift für Physik* la interpretación correcta del experimento de

FIG. 2

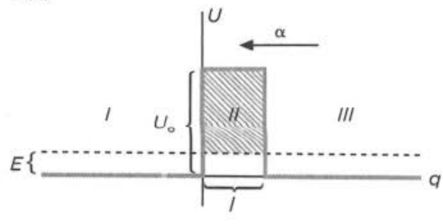


FIG. 3

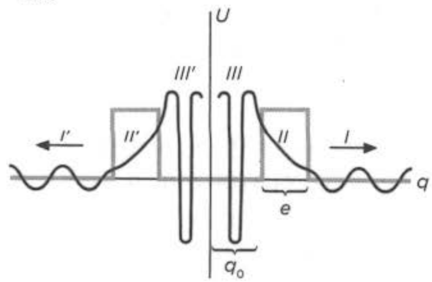


FIGURA 2:
Reproducción de la figura original del artículo de Gamow en el que explicaba el proceso de desintegración α. Gamow utilizó esta ilustración para resolver el problema de la transmisión a través de una barrera finita de potencial.

FIGURA 3:
En esta figura, Gamow ilustra la solución en el caso de un potencial simétrico con dos barreras rectangulares.

Rutherford en un artículo titulado «Sobre la teoría cuántica de los núcleos atómicos», firmado el 29 de julio de 1928 y que se recibió en la redacción de la revista el 2 de agosto, apenas dos meses después de su llegada a Gotinga.

En su artículo, Gamow no se ciñe exclusivamente al experimento de Rutherford, sino que intenta ilustrar a lectores que, posiblemente, no eran duchos en la teoría cuántica. En primer lugar aborda una situación simple que, sin embargo, tiene los ingredientes fundamentales del problema de física nuclear que le preocupaba: una partícula con una cierta energía cinética que atraviesa una barrera rectangular de potencial (figura 2). La experiencia adquirida en Leningrado junto a Ivanenko y Landau le permitió resolver este ejercicio de manera sencilla, tal y como aún hoy día se explica a los estudiantes de mecánica cuántica básica.

Seguidamente, estudia la dinámica de una partícula que atraviesa dos barreras de potencial simétricas (figura 3).

Finalmente, aborda el problema nuclear y, aunque no conocía con detalle la forma del potencial nuclear en las proximidades del núcleo, los dos problemas sencillos resueltos le permiten establecer las pautas para el caso de la interacción de las partículas α con los núcleos. Al final del artículo Gamow explica:

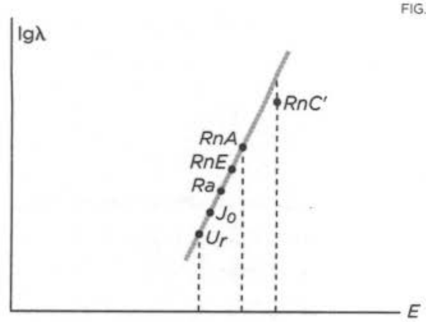
> Es conocido que si dibujamos el logaritmo de la constante de desintegración frente a la energía de la partícula emitida, todos los puntos de una familia radiactiva definida caen en una línea recta [figura 4].

Para diferentes familias obtenemos diferentes líneas paralelas. La fórmula empírica reza:

$$\lg \lambda = \text{Const} + b\,E,$$

donde b es una constante que es común a todas las familias radiactivas. El valor experimental de b (calculado de Ra – A y Ra) es:

$$b_{\text{exper.}} = 1{,}02 \cdot 10^{+7}.$$



Reproducción de la figura original del artículo de Gamow en el que explica el proceso de desintegración α. Aquí Gamow representa el logaritmo de la constante de desintegración de varios isótopos radiactivos α de la familia del radio, en función de la energía de las partículas α emitidas.

Si usamos el valor de la energía de Ra–A en nuestra fórmula obtenemos:

$$b_{\text{teor.}} = 0{,}7 \cdot 10^{+7}.$$

El acuerdo en el orden de magnitud muestra que las suposiciones básicas de nuestra teoría deben ser correctas.

Los núcleos a los que Gamow aplicó el modelo son conocidos hoy día como ^{208}Po (el Ra–A) y ^{226}Ra (el Ra) y, efectivamente, tenía razón en su conclusión y su teoría era correcta.

Una de las anécdotas de este trabajo tiene que ver con los agradecimientos que se muestran al final del mismo. Gamow da las gracias a Born por haberle permitido trabajar en su instituto de Gotinga, pero antes expresa su gratitud a un colega ruso, Kotshchin, un matemático que se encontraba también de visita en la ciudad alemana aquel verano, por haberle prestado ayuda con los desarrollos matemáticos del trabajo. En su autobiografía Gueorgi cuenta que su principal dificultad matemática fue el cálculo de la integral:

$$\int dr\,(1 - a/r)^{1/2}$$

y que Kotshchin, sorprendido ante la pregunta, le dijo que con toda seguridad suspendería a cualquier estudiante de grado que no fuera capaz de hacer una tarea tan elemental; no obstante, le proporcionó el resultado y cuando el artículo apareció publicado Kotshchin le contó que había sido motivo de guasa entre sus com-

pañeros cuando les dio detalles de cuál había sido realmente la ayuda prestada.

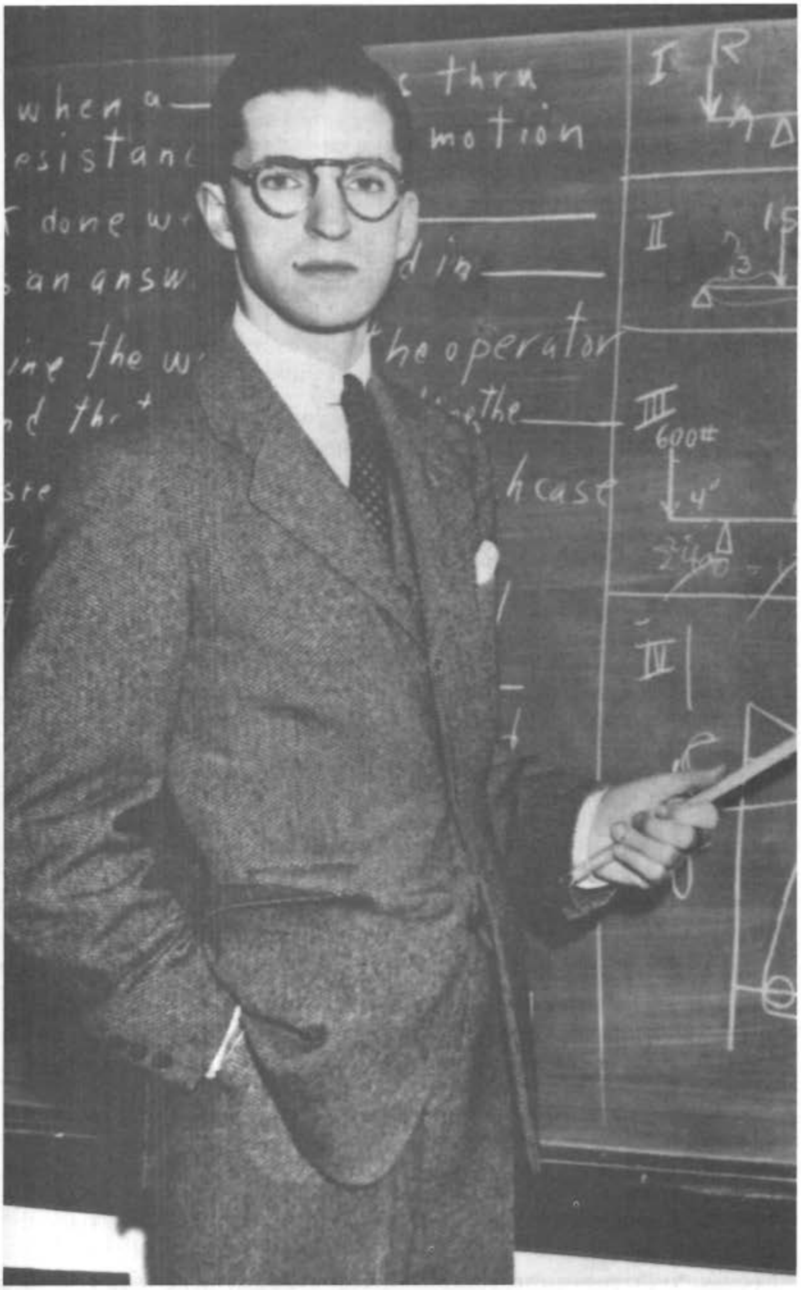
EL EFECTO TÚNEL

El fenómeno que Gamow describió en su trabajo se conoce en física como *efecto túnel*. Sin embargo, en el artículo de Gamow ese nombre no aparece. Otros dos físicos, el inglés Ronald Wilfrid Gurney (1898-1953) y el estadounidense Edward Uhler Condon (1902-1974), que entonces trabajaban en la Universidad de Princeton, publicaron en la revista *Nature* una breve carta en la que desarrollaban un modelo prácticamente idéntico al de Gamow. El artículo, titulado «Mecánica de ondas y desintegración radiactiva», estaba fechado el 30 de julio de 1928, exactamente un día más tarde de que Gueorgi firmara el suyo. Tampoco estos autores mencionan el efecto túnel.

Al parecer el nombre no se empezó a utilizar hasta algunos años más tarde y son muchos los textos en los que se adjudica a Gamow, Gurney y Condon la formulación teórica del fenómeno. Sin embargo, los primeros trabajos en los que se describe la idea se deben al físico alemán Friedrich Hund (1896-1997), célebre por sus numerosas aportaciones sobre la estructura de átomos y moléculas. En 1927 publicó en *Zeitschrift für Physik* un trabajo en tres partes titulado «Sobre la interpretación del espectro molecular», en las que plantea un pozo de potencial doble en una dimensión para modelar el enlace químico. Ya en esos artículos Hund se percata de la dependencia exponencial de la probabilidad de que las partículas atraviesen barreras de potencial que Gamow también dedujo en su trabajo sobre la desintegración α.

El mismo año, otro físico alemán, L. Nordheim, publicó un artículo titulado «Sobre la teoría de la emisión térmica y de la reflexión de electrones en metales», también en *Zeitschrift für Physik*, en el que aplicó el efecto túnel para describir la emisión electrónica por metales.

Todavía antes de que Gamow interviniera en el problema, otro físico de renombre, Julius Robert Oppenheimer (1904-1967),



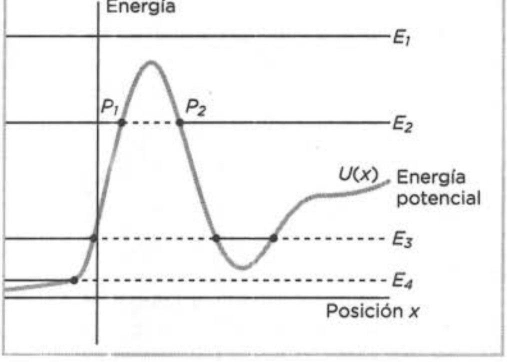
Gamow tuvo la fortuna de trabajar en los mejores centros de la época dedicados a la investigación y desarrollo de la física nuclear, la materia que más le interesaba en sus años de juventud, y en todos ellos deslumbró por su brillantez e inteligencia.

UN EFECTO PURAMENTE CUÁNTICO

El efecto túnel es uno de los fenómenos cuánticos más conocidos, seguramente debido a la fascinación que irradia, porque no es posible en el mundo cotidiano macroscópico regido por la mecánica clásica de Newton. Veamos en qué consiste. Un cuerpo de masa m, que se mueve con velocidad v, tiene asociada una magnitud que se denomina *energía cinética* y que en mecánica clásica se define como:

$$T = mv^2/2.$$

Es una magnitud positiva (o nula cuando el cuerpo está en reposo). Los cuerpos pueden tener asociado, debido a la posición que ocupan, otro tipo de energía que se denomina *energía potencial*, U, y que solo puede definirse si sobre el cuerpo actúan *fuerzas conservativas*. Ejemplos de este tipo de fuerzas son la gravitatoria, la elástica, la eléctrica y la magnética. Otras fuerzas usuales como, por ejemplo, las fuerzas de rozamiento, la fuerza motriz de los motores o la fuerza muscular, son fuerzas *no conservativas*. Pues bien, supongamos que la energía potencial de un cuerpo que se está moviendo en una dirección tiene la forma que se muestra en la figura. Como vemos, según la posición en la que se encuentre el cuerpo, su energía potencial, $U(x)$, toma distintos valores, presentando máximos y mínimos. En física, la suma de la energía cinética y la energía potencial se denomina *energía mecánica total*. Existe un resultado fundamental, que se conoce como *teorema de conservación de la energía mecánica total*, que dice que si sobre un cuerpo solo actúan fuerzas conservativas, la energía mecánica total del mismo se conserva. Es decir, que en esas circunstancias, el cuerpo se moverá de manera que su energía total no cambia, independientemente de cuáles sean su posición y su velocidad. Supongamos, por ejemplo, que el cuerpo tiene una energía total igual a E_1 que, como vemos en la figura, es mayor que su energía potencial en cualquier punto en que se pueda encontrar en su movimiento. La energía cinética de ese cuerpo variará según su posición y estará dada por $T_1(x) = E_1 - U(x)$. La velocidad del cuerpo será por tanto:



$$v = 2\,[E_1 - U(x)]^{1/2} / m,$$

y como E_1 es mayor que $U(x)$, podemos calcular la raíz cuadrada y la velocidad tendrá un valor real y positivo. Con esa energía total, el cuerpo puede moverse «libremente» (por supuesto, de acuerdo a las leyes de la mecánica newtoniana) a cualquier posición x. Si la energía total del cuerpo es E_2, la situación es diferente. El cuerpo puede moverse (igual que antes) a cualquier punto de las zonas a la izquierda de P_1 y a la derecha de P_2. Como vemos, en esas posiciones la energía total E_2 es mayor que la energía potencial $U(x)$ y es posible obtener la velocidad. Sin embargo, en los puntos situados entre P_1 y P_2 ocurre lo contrario: $U(x)$ es mayor que E_2; tendríamos que calcular la raíz cuadrada de una cantidad negativa y, por tanto, la velocidad no sería una cantidad real sino imaginaria y no sería «válida». Los puntos P_1 y P_2 se denominan *puntos de retroceso clásico* y cuando el cuerpo llega a ellos se encuentra una barrera de potencial que le impide proseguir su movimiento en ese sentido. Una situación similar se presenta cuando el cuerpo tiene energías totales E_3 (en cuyo caso aparecen tres puntos de retroceso clásico) y E_4 (con un único punto de retroceso).

Diferencia con la mecánica cuántica

En mecánica cuántica esto no es así. La dinámica de un cuerpo está regida por su función de onda, cuyo módulo al cuadrado nos informa sobre la probabilidad de que el cuerpo se encuentre en una determinada posición. En las regiones clásicamente permitidas, la función de onda describe el cuerpo en movimiento, igual que en mecánica clásica; sin embargo, cuánticamente siempre hay una probabilidad no nula de que el cuerpo se encuentre en un punto de una región clásicamente prohibida. Como Gamow conocía, la función de onda en esas regiones responde a una función exponencial decreciente y, salvo que la región prohibida sea infinita (como sucede en el ejemplo de la figura a la derecha del punto de retroceso para la energía E_4), la función de onda permite «conectar» las regiones permitidas a ambos lados de la zona prohibida. A todos los efectos es como si el cuerpo hubiera encontrado en su camino un túnel que le hubiera permitido atravesar (con una cierta probabilidad, que es posible calcular y medir) la barrera de potencial.

El efecto túnel en la práctica

El efecto túnel se pone de manifiesto en el caso de barreras de potencial de unos pocos nanómetros de anchura y en él están basados muchos dispositivos tecnológicos ampliamente usados hoy día. Entre otros, podemos mencionar el microscopio de efecto túnel, los transistores, los diodos led, etc. Muchos fenómenos relacionados con la superconductividad y con la física de semiconductores, como el efecto Josephson o la emisión fría de electrones, con la radiactividad y con algunos tipos de mutación espontánea observados en la molécula de ADN tienen su origen en el efecto túnel cuántico.

muy conocido por haber sido director científico del Proyecto Manhattan, en el que se desarrolló la bomba nuclear estadounidense, publicó aquel mismo año un trabajo titulado «Sobre la teoría cuántica de las corrientes de campo autoeléctricas», en la revista *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, en el que también discute el concepto de efecto túnel sin nombrarlo explícitamente.

A pesar de que Gurney y Condon establecieron la misma teoría que Gamow, se equivocaron en dos cuestiones. La primera es que conjeturaron que la desintegración β se podía describir en el marco de la misma teoría. Sin embargo, este fenómeno nuclear es mucho más complejo y Gamow sabía que así era. La segunda es que establecieron una diferencia entre el proceso que ocurre cuando la partícula α «sale» del núcleo (en la desintegración α) y el que aparece cuando «trata de entrar en él» (como en el caso del experimento de Rutherford). En esencia, Gurney y Condon argüían que la partícula α «chocaba contra la barrera 10^{20} veces por segundo» cuando trataba de salir, mientras que «cada una solo impacta una vez» cuando tratan de entrar. Sobre la base de esta hipótesis, y en un trabajo publicado en febrero de 1929 en *The Physical Review*, descartaron la posibilidad de explicar, mediante la misma teoría, la aparición de radiactividad artificial tras el bombardeo de núcleos con partículas α. Sin embargo, Gamow había escrito en noviembre de 1928 un trabajo, que fue publicado en julio de 1929 de nuevo en *Zeitschrift für Physik*, y que se titula «Sobre la teoría cuántica de la fisión atómica», en el que aplicaba su modelo a dicho proceso. Por tanto, no solo pudo explicar la ley de Geiger-Nuttall sino que, además, fue capaz de dar cuenta de las observaciones de Rutherford en su experimento. Y no solo eso: con su descripción del proceso de dispersión de partículas cargadas por núcleos, mostró el camino que unos años después, en 1932, permitió al físico inglés John Douglas Cockcroft (1897-1967) y al irlandés Ernest Walton (1903-1995) construir el primer acelerador de protones en Cambridge. Ambos compartieron el premio Nobel de Física en 1951 por su trabajo pionero sobre la transmutación de los núcleos atómicos mediante partículas atómicas aceleradas artificialmente.

A decir de Hans Bethe, otro gran físico alemán, premio Nobel de Física en 1967, los dos trabajos de Gamow pueden considerarse como la primera aplicación exitosa de la teoría cuántica en el ámbito de la física nuclear.

En el artículo de agosto de 1928, Gueorgi, refiriéndose al modelo «de satélites» de Rutherford, dice textualmente: «Pero esta suposición parece muy poco natural y difícilmente puede ser la imagen verdadera». Un pipiolo de apenas veinticuatro años echaba por tierra una hipótesis de Rutherford, en aquel entonces la máxima referencia mundial en la física nuclear. Gamow había presentado por todo lo alto sus credenciales como físico.

CAPÍTULO 2

Gamow en Cambridge

En septiembre de 1928, Gamow viajó a Copenhague para conocer a Bohr, quien, impresionado por el trabajo que había llevado a cabo aplicando la mecánica cuántica a la física nuclear, le ofreció una beca para que trabajara en su instituto. Siguió investigando en ese mismo campo y entre 1929 y 1931 residió en Cambridge, donde se incorporó al grupo de investigación de Rutherford. Regresó a Leningrado y, con motivo del Congreso Solvay de Física Nuclear de 1933, salió de la URSS y nunca más volvió.

El verano de 1932, Gamow y su mujer fueron de vacaciones a una residencia que la Comisión para la Ayuda de los Científicos soviética tenía en Crimea, no lejos de Yalta. Por mediación del grupo de deportes de la residencia, consiguieron adquirir una piragua desmontable argumentando que pretendían estudiar su comportamiento en alta mar. Unos meses antes la embarcación había empezado a manufacturarse en una fábrica de Moscú. Durante algunas semanas estuvieron haciendo pruebas para optimizar su bogado y aprovisionándose secretamente con comida y bebida para varias jornadas de navegación. Un día de julio que el agua estaba en calma, tras avisar en la residencia que no volverían a dormir porque pensaban visitar un observatorio cercano, se embarcaron para cruzar el mar Negro. Era su primer intento para escapar de la URSS. El plan era navegar hasta la costa turca, que distaba algo más de 250 kilómetros. El primer día todo fue muy bien, pero al caer la noche comenzó una tormenta que se prolongó durante todo el día siguiente y estuvieron a punto de irse a pique. Habían salido a ciegas, ya que la previsión meteorológica era entonces información reservada y cualquier pregunta al respecto habría levantado sospechas. La aventura concluyó en una playa de Crimea, apenas 100 kilómetros al este del punto del que habían partido. Consiguieron convencer a todo el mundo de que la tormenta había desbaratado sus planes iniciales (lo cual era cierto) e incluso pre-

sentaron, para evitar cualquier sospecha, un informe en el que pusieron de manifiesto que el comportamiento de la piragua había sido muy bueno excepto en el caso de mar gruesa.

COPENHAGUE, CAMBRIDGE Y VUELTA A RUSIA

En septiembre de 1928, Gueorgi había agotado prácticamente todo su dinero y se vio obligado a dejar Gotinga y volver a Leningrado. Pero antes de regresar a la URSS, dada la gran admiración que sentía por el gran físico Niels Bohr, organizó una visita de dos días a Copenhague para conocerlo.

Gamow relata en su autobiografía que gracias a la secretaria de Bohr, Elisabeth Schulz, pudo encontrarse con él. Al parecer Bohr tenía una agenda muy ocupada durante varios días, pero Gueorgi consiguió verlo, eso sí, después de haber rogado a la señora Schulz que le buscara un hueco para una breve entrevista, ya que solo tenía dinero para estar un día en Copenhague. Bohr atendió a Gamow, se interesó por su trabajo sobre la desintegración α y sobre la marcha le ofreció una beca Carlsberg para que se quedara por un año, ofrecimiento que Gueorgi aceptó inmediatamente. Sin embargo, todo parece indicar que Gamow se había dirigido a Bohr un par de meses antes. Según el historiador científico Roger H. Stuewer, entre la correspondencia científica de Bohr se conserva una carta fechada en julio de 1928 en la que Gueorgi le preguntaba por la posibilidad de realizar una estancia larga en el Instituto de Física Teórica de Copenhague para trabajar con él y le pedía ayuda para diligenciar el correspondiente visado. Sea como fuere, el resultado del breve encuentro fue que Gamow prolongó su estadía fuera de la URSS durante todo el año académico 1928-1929.

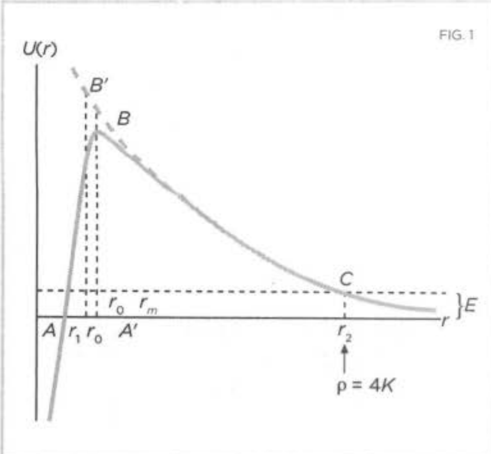
Una de las situaciones que más llamaron su atención durante sus primeras semanas en Copenhague fue la total libertad que existía en el Instituto. No había hora de entrada por la mañana y, menos aún, hora de salida. Y se podía trabajar en lo que cada uno quisiera. Había, no obstante, una excepción: el asistente de Bohr. Según Gueorgi refiere en su autobiografía, Bohr necesitaba hablar

con alguien para expresar sus pensamientos de manera clara y no era muy amigo de los desarrollos matemáticos, que dejaba en manos de su interlocutor. Este último detalle mantuvo a Gamow «alejado del peligro», ya que se esmeró en hacer saber a Bohr que su habilidad con las matemáticas era nula.

NIELS HENRIK DAVID BOHR (1885-1962)



Niels Bohr fue un físico danés que realizó contribuciones fundamentales para el entendimiento de la estructura de los átomos y de la mecánica cuántica. En 1922 recibió el premio Nobel de Física por «sus servicios en la investigación de la estructura de los átomos y de la radiación que emana de ellos». Nacido en Copenhague en 1885, inició sus estudios universitarios en 1903 y se doctoró en 1911 con una tesis sobre la teoría electrónica de los metales. En 1912 se casó con Margrethe Nørlund, con quien tuvo seis hijos. Uno de ellos, Aage (1922-2009), también fue galardonado con el Nobel de Física en 1975. Niels Bohr formuló en 1913 su modelo atómico planetario, en el que introdujo hipótesis novedosas que supusieron un cambio fundamental en la física. En una serie de tres artículos que publicó en *Philosophical Magazine* estableció la existencia de órbitas circulares estables de los electrones alrededor del núcleo y que la emisión de fotones con energías definidas solo ocurría cuando los electrones cambian de una órbita a otra y esto le permitió explicar algunos de los datos experimentales de los que se disponía entonces. En 1918 consiguió que el Gobierno danés, con aportaciones privadas de varias empresas y, sobre todo, de la Fundación Carlsberg, creara el Instituto de Física Teórica, el Niels Bohr Institute, que ha sido un referente en la física desde 1920, cuando comenzó a funcionar. Durante la ocupación nazi de Dinamarca tuvo que huir a Suecia y a Gran Bretaña y más tarde fue miembro de la comisión británica que participó en el Proyecto Manhattan. Posteriormente, en los primeros años de la década de 1950, estuvo involucrado en la creación del CERN. Murió en 1962. En su honor, el elemento químico con número atómico 107, que fue sintetizado en 1981, recibió el nombre de bohrio.



Reproducción de la ilustración original del trabajo de Gamow y Houtermans en la que se muestra el potencial nuclear que consideraron en sus cálculos de la desintegración α.

Antes de salir de Gotinga, Gueorgi había profundizado en el problema de la desintegración α junto a su amigo Fritz Houtermans (1903-1966), un físico austríaco nacido en Prusia. Llevaron a cabo varios cálculos del proceso, sobre la base de una descripción más detallada del potencial nuclear (figura 1), que plasmaron en un trabajo titulado «Sobre la mecánica cuántica de los núcleos radiactivos», que terminaron de escribir en septiembre de 1928, justo antes de que Gamow partiera para Copenhague, y que apareció publicado en julio de 1929 en *Zeitschrift für Physik*.

Ya en Copenhague, en octubre de 1928, el primer trabajo que culminó fue el titulado «Sobre la teoría cuántica de la fisión atómica», mencionado con anterioridad, y en el que exploró la posibilidad de fisionar los núcleos atómicos bombardeándolos con partículas α.

Este artículo puede considerarse como uno de los primeros hitos en la historia de la construcción de aceleradores de partículas, pero lo que quizá llamó más la atención de Bohr fue el hecho de que muchos de los datos experimentales que Rutherford y su grupo habían producido en los últimos años, haciendo colisionar con distintos blancos las partículas α emitidas por núcleos radiactivos, podían explicarse bastante bien con la teoría que Gamow había desarrollado. Bohr entendió que era importante que Gueorgi fuera a Cambridge a discutir con Rutherford y sus colaboradores, a pesar de que podría resultar incómodo el hecho de que acabara de demostrar la falsedad del modelo de satélites de Rutherford. Este era, además, muy reacio hacia los teóricos; de hecho, se dice que, en su opinión, una teoría solo era buena si era lo suficientemente sencilla como para que la entendiera un camarero.

La visita se realizó durante las primeras semanas de 1929 y, como le había ocurrido con Bohr, Gueorgi causó una excelente impresión entre los miembros del grupo de Rutherford. Tanto es así que fue invitado a participar en una sesión especial sobre física nuclear que la Royal Society celebró a principios de febrero de 1929 y en la que expuso sus últimos cálculos sobre los experimentos que se estaban llevando a cabo en el laboratorio Cavendish. Todo un acontecimiento para un joven que aún no había cumplido los veinticinco.

De vuelta en Copenhague participó en una reunión internacional que había organizado Bohr en abril y se postuló para una beca de la fundación Rockefeller con la intención de, en el caso de obtenerla, profundizar en el estudio de la estructura nuclear, la desintegración β y el origen de la radiación γ. Para la solicitud contó con las recomendaciones de Bohr y Rutherford y desde ese momento Gueorgi pensó que la beca le sería concedida con seguridad, como así fue. Pero como el inicio de la misma estaba estipulado para el otoño siguiente, y la beca Carlsberg terminaba, volvió a Leningrado en mayo de 1929.

A su llegada tuvo un recibimiento exultante por parte de todo el mundo, no solo en la universidad. En su autobiografía Gueorgi transcribe algunos de los comentarios que aparecieron en los periódicos: «Un hijo de la clase trabajadora ha explicado la pieza más diminuta de la maquinaria del mundo: el núcleo de un átomo»; «Un soviético ha mostrado a Occidente que el suelo ruso puede producir sus propios platones y perspicaces newtons». Incluso *Pravda*, el órgano oficial del Partido Comunista, publicó en primera página un poema en su honor.

En los meses que siguieron tuvo tiempo de visitar a su padre en Odesa y a sus amigos de Leningrado. Dada su fama, no tuvo problema en obtener el visado para volver a salir de la URSS y poder disfrutar de su beca, ni tampoco en que la correspondiente comisión universitaria le concediera el oportuno permiso para realizar la estancia de un año en el laboratorio Cavendish. Y así, en septiembre de 1929, viajó de nuevo a Cambridge, aunque, en lugar del año previsto, su visita a Europa occidental se prolongó hasta la primavera de 1931.

EL MODELO NUCLEAR DE LA GOTA LÍQUIDA

En diciembre de 1928, durante los últimos días de su estancia en Gotinga, Gueorgi había concebido un modelo nuclear que con el paso del tiempo tuvo una gran repercusión: el «modelo de la gota líquida».

En la visión de Gamow, el núcleo estaba formado por un conjunto de partículas α que, cargadas positivamente, se repelían entre sí debido a la fuerza de Coulomb pero que, cuando se encontraban a cortas distancias unas de otras, también interactuaban con fuerzas atractivas que permitían compensar la repulsión electrostática. Debido a sus energías cinética y potencial, esas partículas α ejercían una presión hacia fuera del núcleo pero eran mantenidas dentro del mismo por la acción de una «tensión superficial», exactamente igual que ocurre en una gota de líquido. Con esta hipótesis es posible calcular la energía total del núcleo (de la «gota») en función del número de partículas α que contiene o, lo que es lo mismo, de su peso atómico. La primera referencia del modelo está en el artículo titulado «Discusión sobre la estructura del núcleo atómico», publicado en el número de abril de 1929 de la revista *Proceedings of the Royal Society of London*, que contenía las intervenciones de los participantes en la reunión de la Royal Society a la que Gamow fue invitado durante su primera visita a Cambridge.

En marzo de 1930, Gamow publicó un artículo titulado «Curva de defecto de masa y constitución nuclear», también en los *Proceedings of the Royal Society of London*, en el que desarrollaba cuantitativamente su modelo. En la actualidad sabemos que los núcleos estables están ligados debido a la acción de la interacción fuerte, que mantiene unidos a neutrones y protones venciendo la repulsión entre protones. Para separar el núcleo en sus constituyentes es necesaria una cierta energía, denominada *energía de enlace*, $B(Z,N)$, que depende del número de protones, Z, y de neutrones, N, del núcleo en cuestión. En otras palabras, el núcleo estable tiene una energía menor que todos los protones y neutrones que lo forman, separados suficientemente para que no puedan interactuar entre sí y en reposo. De acuerdo a la conocida ecuación debida a Einstein, toda energía E tiene una masa equivalente

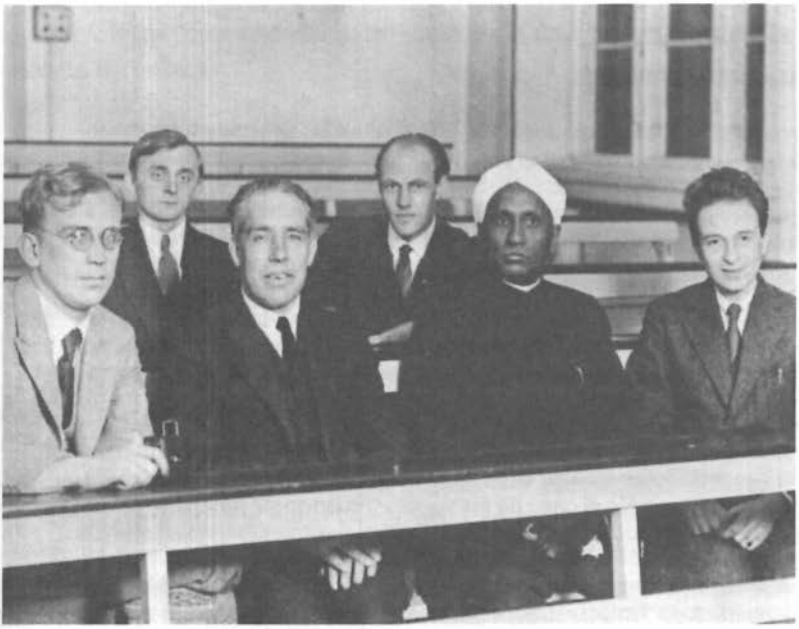


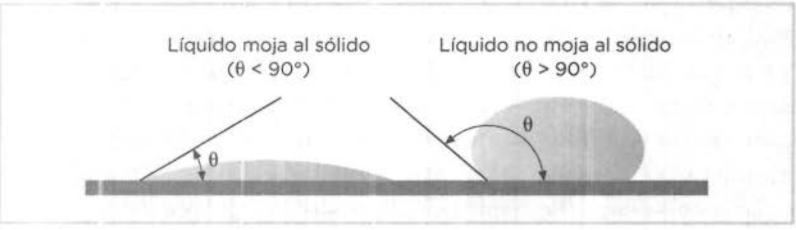


FOTO SUPERIOR:
Entre 1928 y 1931, Gamow tuvo la ocasión de participar en las investigaciones sobre física cuántica de dos de los centros más relevantes a nivel internacional: el laboratorio Cavendish, en Cambridge, y el Instituto de Física Teórica de Copenhague (el actual Instituto Niels Bohr). La fotografía muestra a varios de los científicos que formaban parte de este último: de izquierda a derecha, Gamow, C.C. Lauritsen, Niels Bohr, E.K. Rasmussen, S. Chandrasekhar y Oskar Klein.

FOTO INFERIOR:
Equipo de trabajo del laboratorio Cavendish en 1931, entonces dirigido por W.H. Bragg (sentado en el centro). Gamow se encuentra en el extremo derecho, fumando en pipa.

LA TENSIÓN SUPERFICIAL

La superficie libre de los líquidos tiene una propiedad asociada a las características de la interacción entre sus moléculas que se denomina *tensión superficial*. El fenómeno en cuestión se pone de manifiesto en numerosas situaciones que son fácilmente reproducibles en la práctica. Por ejemplo, si colocamos en la superficie del agua un trozo de alambre fino, no se hunde a pesar de que el empuje hidrostático que ejerce el agua, que según el principio de Arquímedes es igual al peso del volumen de agua desalojada, es menor que el peso del alambre. También de la tensión superficial se valen las chinches acuáticas *(Hydrometra stagnorum)*, unos insectos que son capaces de «caminar» sobre el agua. A pesar de que en apariencia el comportamiento de la superficie del líquido tiene cierta similitud con el de una membrana elástica tensa, el comportamiento molecular es diferente. En el caso de la membrana elástica, cualquier deformación de la misma producida, por ejemplo, por un cuerpo que se sitúa sobre ella hace que las moléculas superficiales se separen. En el caso de los líquidos, cuando su superficie se deforma por la misma causa, las moléculas superficiales mantienen la distancia que hay entre ellas, y otras moléculas del interior del líquido ocupan los espacios dejados por las primeras. En el primer caso, son las fuerzas elásticas que actúan entre las moléculas superficiales de la membrana, y que tienden a juntarlas de nuevo, las que mantienen la estructura de la membrana; esas fuerzas son, además, tanto más grandes cuanto mayor es la deformación. En el caso de los líquidos, es la atracción que las moléculas superficiales sufren por parte de las moléculas próximas del interior del líquido la responsable de que la superficie no se rompa. Algunas propiedades de los líquidos como, por ejemplo, el ángulo que forma su superficie con una pared sólida con la que está en contacto (véase la figura), la forma esférica de las gotas líquidas o la capilaridad, están relacionadas con la tensión superficial, que es modificada por los cambios de temperatura o la presencia de sustancias extrañas, pero que no depende del área de la superficie líquida.



Ángulo de contacto entre una gota de líquido y un sólido. En líquidos como el agua, es decir, que «mojan», el ángulo de contacto es menor de 90°, mientras que en los que «no mojan», como el mercurio, ese ángulo es mayor de 90°.

$m = E/c^2$. Pues bien, el defecto de masa es la masa equivalente a la energía de enlace:

$$\Delta m(Z,N) = B(Z,N)/c^2.$$

A finales de la década de 1920, el químico y físico inglés Francis William Aston (1877-1945), premio Nobel de Química en 1922, había obtenido un buen número de datos experimentales sobre las masas de muchos isótopos, que había ido identificando mediante un espectrómetro de masas que él mismo había construido en el laboratorio Cavendish, donde trabajó por invitación de Thomson desde 1910. Gamow usó esa información en su trabajo. Conviene volver a recordar que en aquel entonces aún no había sido descubierto el neutrón y que los núcleos se creían compuestos por protones o partículas α y electrones. Aun así, el cálculo que llevó a cabo Gamow en su trabajo es muy interesante, ya que en él hace uso de toda la maquinaria desarrollada en el marco de la mecánica cuántica. En un principio ignoró los electrones y partió de un núcleo constituido por N_α partículas α. La energía cinética de cada una de ellas la estimó a partir del principio de incertidumbre de Heisenberg y la energía potencial usando el denominado *teorema del virial*, un resultado que establece que para determinados tipos de potencial de interacción, como el que se suponía para el caso de las partículas α, la energía potencial de una partícula es dos veces su energía cinética cambiada de signo. Por otro lado, igualando la tensión superficial, calculada con la fórmula de Debye, con la presión interna, obtenida a partir de la energía cinética de las partículas α, pudo encontrar una expresión que relacionaba el radio nuclear con $N_\alpha^{1/3}$. Por tanto, la energía interna de las partículas α resultaba negativa, es decir, que correspondía a un término atractivo de la interacción entre ellas, y era proporcional a $N_\alpha^{1/3}$. Además, las partículas α se repelen entre sí y la energía electrostática coulombiana en la superficie nuclear es positiva y proporcional a $N_\alpha^{5/3}$.

Pudo así Gamow calcular la energía total, que es la suma de la energía interna y de la de repulsión electrostática, para distintos núcleos, es decir, para distintos valores de N_α, y obtuvo los

FIG. 2

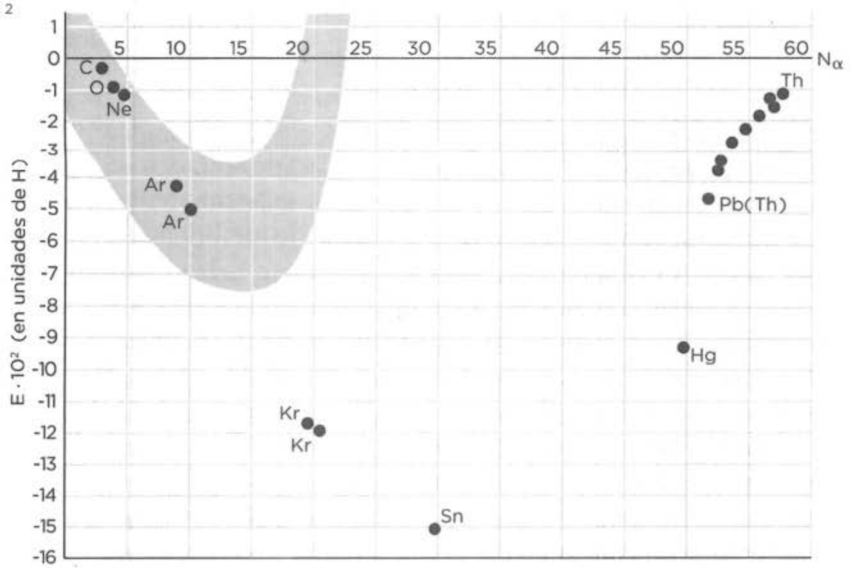


Ilustración del trabajo de Gamow sobre el modelo de la gota líquida. Se muestran las energías totales de distintos isótopos (en unidades de la masa del hidrógeno) en función del número de partículas α en el isótopo. Los puntos representan los datos experimentales de Aston, mientras que la zona sombreada representa el resultado de Gamow.

valores representados como una zona sombreada en la figura 2 que, como vemos, no concuerda muy bien con los datos de Aston (representados como puntos): el mínimo del cálculo de Gamow aparecía para $N_\alpha \sim 15$, mientras que en los datos experimentales ese mínimo estaba en 30-35 partículas α.

A la vista de los resultados, modificó el modelo del que había partido, incluyendo los electrones cuyo papel había ignorado inicialmente. Siguiendo los resultados del físico austro-húngaro G. Beck, que había determinado el número de electrones nucleares que debían tener muchos de los núcleos entonces conocidos, calculó la energía total en función, de nuevo, de N_α, encontrando que el acuerdo con los datos de Aston podía mejorar significativamente.

El descubrimiento del neutrón en 1932 por Chadwick supuso un cambio drástico en el devenir del modelo de la gota líquida. Primero Heisenberg, que había ganado el premio Nobel de 1932 por sus importantes aportaciones en mecánica cuántica, y más tarde un estudiante suyo, Von Weizsäcker (1912-2007), extendieron el modelo teniendo en cuenta el papel del neutrón en el nú-

cleo. En 1935, en un artículo publicado en *Zeitschrift für Physik* con el título de «Sobre la teoría de las masas nucleares», Von Weizsäcker dio a conocer su famosa fórmula semiempírica de masas, una expresión que permite calcular la masa de los núcleos en función del número de protones y neutrones que lo forman y que tiene en cuenta los distintos términos que contribuyen a la misma (volumen, superficie, asimetría, carga y apareamiento).

Hasta ese momento, el interés había estado centrado en la determinación de los defectos de masa, es decir, en propiedades estáticas del modelo. Pero a partir de 1936 se inició una segunda etapa en la historia del modelo de la gota líquida en la que se estudiaron sus características dinámicas, analizándose las excitaciones nucleares. El primer evento de esta nueva fase se debe a Bohr, que ese mismo año publicó «Captura neutrónica y constitución nuclear» en la revista *Nature*, trabajo en el que expuso su teoría del núcleo compuesto y en la que tomó en consideración un hecho muy relevante descubierto dos años antes por el físico italiano Enrico Fermi (1901-1954): contrariamente a lo que cabría pensar basándose en argumentos energéticos sencillos, los neutrones lentos (es decir, poco energéticos) son más eficaces que los rápidos (con gran energía) para hacer que se produzcan determinadas reacciones nucleares. De esa manera, un neutrón que colisiona contra un núcleo le transfiere su energía, haciendo que su superficie (solo la superficie) oscile y su temperatura aumente; seguidamente, se emite un neutrón de manera que el núcleo se enfría para, finalmente, emitir radiación γ que hace que el núcleo vuelva a su estado energético inicial, con la temperatura que tenía antes de la colisión. Este proceso de interacción fue descrito en un trabajo titulado «Sobre la transmutación de los núcleos atómicos por el impacto de partículas materiales (I). Notas teóricas generales», que publicaron Bohr y su ayudante danés Fritz Kalckar en una revista danesa en 1937. Ya fuera porque Bohr pensaba que la aplicación del modelo de la gota líquida que habían llevado a cabo era muy diferente de la que Gamow, Heisenberg y Von Weizsäcker habían hecho unos años antes para calcular los defectos de masa, o simplemente por olvido, el caso es que los trabajos de estos autores no fueron citados por Bohr y

Kalckar. Bohr tampoco los mencionó en su trabajo «El mecanismo de la fisión nuclear», que publicó en 1939 junto con el físico estadounidense John Archibald Wheeler en *The Physical Review*. La autoría de la invención del modelo de la gota líquida quedó así atribuida a Bohr y Kalckar. Otros autores, como por ejemplo Bethe, tampoco deshicieron el entuerto y la historia quedó definitivamente sesgada en esta cuestión.

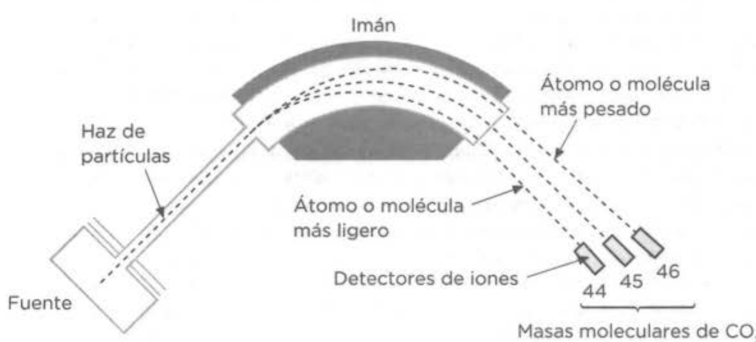
No puede hablarse de este modelo, que jugó un papel fundamental en el desarrollo de la física nuclear, sin mencionar a Lise Meitner (1878-1968) y su sobrino Otto Frisch (1904-1979), ambos austríacos de nacimiento. En diciembre de 1938 se encontraron en

EL ESPECTRÓMETRO DE MASAS

La espectrometría de masas es una técnica analítica cuyo objeto es obtener el espectro de las masas de los átomos y moléculas que constituyen una muestra de material, y es de mucha utilidad en química y física. Para ello hace uso de unos dispositivos denominados *espectrómetros de masas*, que se basan, fundamentalmente, en el hecho de que cuando una partícula cargada atraviesa una región del espacio en la que hay presente un campo magnético uniforme, sigue una trayectoria circular de radio $r=mv/(qB)$, donde m es la masa de la partícula, v su velocidad, q su carga y B la intensidad del campo magnético. Un espectrómetro de masas consta de una fuente que produce un haz de partículas, más concretamente, iones de los átomos o moléculas que forman la muestra que se pretende estudiar. Para ionizar esos átomos y moléculas existen distintas técnicas como, por ejemplo, el bombardeo con electrones o el uso de láseres. Una vez formado el haz, se acelera hasta que los iones alcanzan todos la misma energía cinética. Cuando entran en la región del campo magnético, son desviados siguiendo trayectorias circulares que tienen un radio tanto más grande cuanto mayor sea su masa y cuanto menor sea su carga. En otras palabras, los iones más ligeros son desviados en mayor medida que los más pesados, y los iones con más carga son desviados más que los menos cargados. Cuando salen de la zona de acción del campo eléctrico estarán separados según la relación masa/carga de cada uno de ellos, permitiendo su identificación. Usualmente una gran parte de los iones generados en la fuente tienen la misma carga, con lo que es posible separarlos en el detector según sea su masa. La espectrometría de masas tiene su origen en los estudios de las descargas en gases que llevaron al físico alemán E. Goldstein (1850-1930) a descubrir los rayos anódicos, formados por iones positivos. En 1913, J.J. Thomson (1856-1940) descubrió dos de los isótopos

Kungälv, apenas 17 km al norte de Gotemburgo, en Suecia, donde pasaron las vacaciones de Navidad con unos amigos. Unos días antes, la física austríaca Meitner había recibido una carta de Otto Hahn (1879-1968), un químico alemán que ganaría el premio Nobel de Química en 1944 por el descubrimiento de la fisión nuclear. En la carta, Hahn le relataba cómo, junto al también químico alemán Fritz Strassmann (1902-1980), había continuado los experimentos que habían empezado con ella antes de que tuviera que salir de Alemania tras el ascenso de los nazis y cómo habían encontrado bario como producto de la reacción, después de bombardear uranio con neutrones. Tía y sobrino entendieron en aquel momento

del Ne cuando hizo pasar un haz de neón ionizado por un campo eléctrico y otro magnético. El descubrimiento de isótopos ha sido uno de los campos de más exitosa aplicación de la espectrometría de masas. Cabe mencionar aquí a F.W. Aston, discípulo de Thomson, que fue capaz de identificar un gran número de los isótopos naturales y que había obtenido los defectos de masa que fueron útiles a Gamow para comprobar la validez de su modelo de la gota líquida. Y también al canadiense A.J. Dempster, que descubrió el isótopo ^{235}U. Ambos desarrollaron sus propios espectrómetros y este último estableció las bases teóricas y el diseño básico de los mismos que aún se utiliza hoy día.



Esquema de un espectrómetro de masas: representación de un sistema colector triple preparado para analizar CO_2.

qué ocurría en el proceso estudiado por Hahn y Strassmann y dieron una explicación correcta del mismo basándose en el modelo de la gota líquida.

Cuando uno de los primeros días de 1939, Frisch, de vuelta en Copenhague donde trabajaba con Bohr, le contó sus disquisiciones con Meitner, Bohr exclamó: «¡Qué tontos hemos sido! ¡Deberíamos haberlo visto antes!».

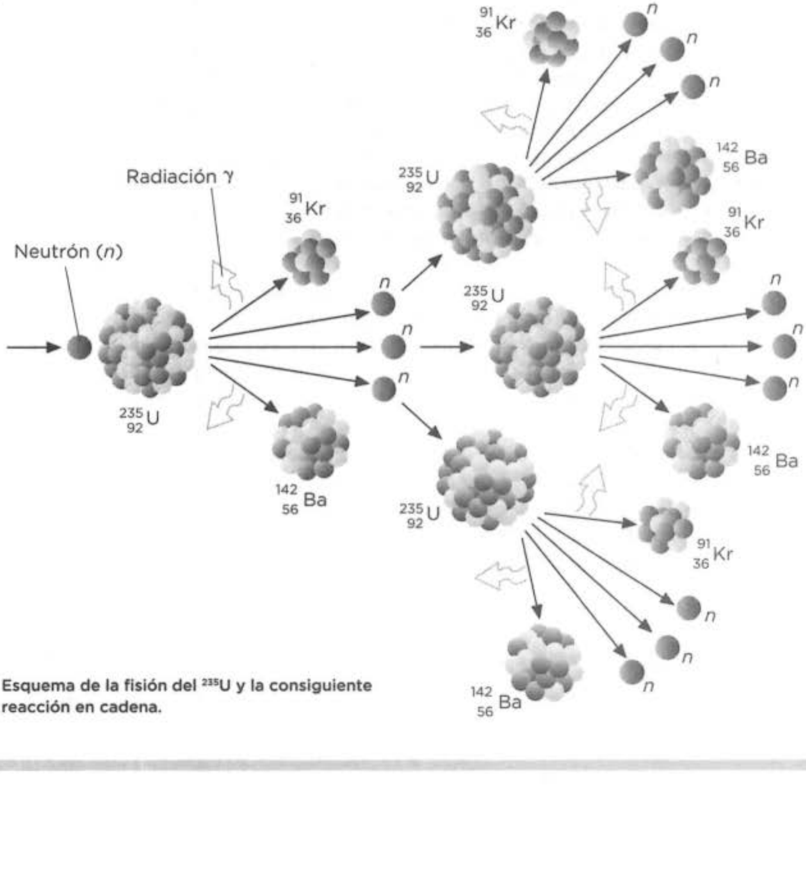
FISIÓN NUCLEAR

La fisión nuclear es una reacción en la que un núcleo pesado se divide en dos o más núcleos de menor masa, emitiéndose además otras partículas, como neutrones. En el proceso se produce una notable cantidad de energía en forma de radiación y de energía cinética de los fragmentos, que se aprovecha en las centrales nucleares para generar energía eléctrica. Los procesos nucleares que inducen la fisión de un núcleo son de muy diversa índole. En el caso del uranio, conocido por ser el combustible de la mayor parte de las centrales nucleares que están operativas hoy día, lo más eficiente es bombardear núcleos de ^{235}U con neutrones «térmicos», cuya energía cinética es muy pequeña, del orden de 0,025 eV. La probabilidad de que, tras absorber un neutrón de este tipo, un núcleo de ^{235}U se fisione es muy alta. El uranio natural está compuesto esencialmente por ^{238}U, en más del 99%, ^{235}U, en un 0,7%, y un porcentaje aún más pequeño de ^{234}U. La probabilidad de que un núcleo de ^{238}U se fisione cuando absorbe un neutrón térmico es prácticamente nula y, aunque esa probabilidad aumenta con la energía del neutrón, en el mejor de los casos es mucho menor que la antes mencionada para el ^{235}U. Por tanto, la forma más eficiente de obtener energía es usar neutrones térmicos. Pero eso hace necesarias dos cosas. La primera es que conviene «enriquecer» el uranio natural para que la fracción de ^{235}U sea lo más grande posible. La segunda es aprovechar los neutrones que se producen tras cada fisión para producir nuevas fisiones. Como los neutrones son emitidos tras la fisión con una energía grande, es necesario reducirla, lo que se consigue utilizando un material «moderador». Los mejores moderadores son materiales con números atómicos bajos (agua, grafito, etc.), que situados alrededor del uranio convierten los neutrones producidos en la fisión en neutrones térmicos capaces de general nuevas fisiones. Otros núcleos, como el ^{239}Pu, tienen una probabilidad de fisión que es más alta para los neutrones de energía intermedia y, por tanto, no es necesario utilizar moderadores. Los reactores que usan plutonio como combustible son por ello mucho más pequeños y son los que se suelen utilizar en los submarinos de propulsión nuclear. Tanto en un caso como en el otro, es posible producir

DE NUEVO EN CAMBRIDGE Y COPENHAGUE

De vuelta en Cambridge, una de las primeras cosas que Gueorgi compró con el estipendio proveniente de su flamante beca Rockefeller fue una motocicleta BSA, con la que se dedicó a recorrer Inglaterra y Escocia y con la que acompañó de turismo a muchos de sus amigos, entre otros a Landau, que lo visitó a principios del

una reacción en cadena: los neutrones generados en una fisión producen nuevas fisiones, que generan otros neutrones que producen nuevas fisiones y así sucesivamente.



Esquema de la fisión del ^{235}U y la consiguiente reacción en cadena.

verano de 1930. Por lo demás, Gueorgi se encontró allí como en casa: el año anterior, su breve visita le había granjeado la confianza de los investigadores, los más jóvenes y los más experimentados y, ¡cómo no!, también la del jefe.

Convencido, al menos en parte, de la validez de la nueva teoría cuántica, sobre todo por los excelentes resultados que Gamow había obtenido explicando sus experimentos con partículas α, Rutherford empezó a pensar en la posibilidad de bombardear núcleos con partículas aceleradas artificialmente y, eventualmente,

LA EXPLICACIÓN DE MEITNER Y FRISCH

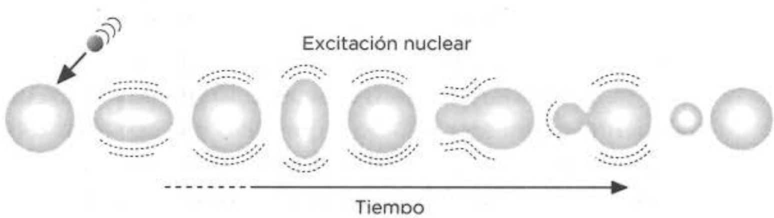
La explicación del proceso de fisión nuclear que Meitner y Frisch propusieron apareció en un artículo publicado en *Nature* a principios de 1939, en el que introdujeron por vez primera el nombre de *fisión* para denominar la reacción que estaban estudiando, dada su similitud con el proceso en el que una célula se divide en dos. En su artículo argumentan que, a la vista de los resultados puestos de manifiesto por Hahn y Strassmann, en los que se demostraba que entre los productos obtenidos después de bombardear uranio con neutrones aparecían isótopos de bario, era lógico pensar que el núcleo de uranio se había fragmentado en dos núcleos mucho más ligeros y de masas similares. Para explicar esta fragmentación utilizaron el modelo de la gota líquida. Aquí se da un extracto de aquel artículo fundamental:

> A primera vista, este resultado es difícil de entender. [...] La emisión, en un corto período de tiempo, de un gran número de partículas cargadas debe excluirse debido a la pequeña penetrabilidad de la «barrera coulombiana» indicada por la teoría de Gamow de la desintegración α.
> Sobre la base, sin embargo, de las ideas actuales sobre el comportamiento de los núcleos pesados, resulta una visión completamente diferente y esencialmente clásica de estos nuevos procesos de desintegración. Teniendo en cuenta el empaquetamiento cercano y el intenso intercambio de energía, se espera que las partículas en un núcleo pesado se muevan de una forma colectiva que tiene cierto parecido con el movimiento de una gota líquida. Si el movimiento se hace suficientemente violento añadiendo energía, esa gota puede dividirse en dos gotas más pequeñas.
> En la discusión de las energías involucradas en la deformación de los núcleos, se ha utilizado el concepto de tensión superficial de la materia nuclear y su valor se ha estimado con consideraciones simples relacionadas con las fuerzas nucleares. Debe recordarse, no obstante, que la tensión

romperlos. De ser posible este tipo de experimentos, se abriría una línea de trabajo en la que las posibilidades eran numerosas ya que, en principio, podría ser factible acelerar una gran variedad de iones, empezando con los protones (los iones de hidrógeno) y siguiendo con los obtenidos a partir de los átomos más ligeros. La pregunta clave era sencilla: ¿qué energía debía comunicarse a esos iones para que el número de reacciones producidas fuera lo suficientemente grande como para permitir la observación de sus efectos? Rutherford sabía a quién tenía que dirigirse. Llamó a

superficial de una gotita cargada es disminuida por su carga y que una estimación grosera muestra que la tensión superficial de los núcleos, al decrecer cuando la carga nuclear aumenta, podría ser nula para números atómicos del orden de 100.

Parece por tanto posible que el núcleo de uranio tiene solo una pequeña estabilidad de forma y puede que, después de la captura del neutrón, se divida él mismo en dos núcleos de aproximadamente el mismo tamaño (dependiendo la razón precisa de tamaños de características estructurales más finas y quizá parcialmente de la fortuna). Estos dos núcleos se repelerán mutuamente y ganarán una energía cinética total de cerca de 200 MeV, como se calcula a partir de las cargas y los radios nucleares. [...] Todo el proceso de «fisión» puede describirse por tanto de una forma esencialmente clásica, sin tener que considerar «efectos de túnel» cuánticos, que serían en realidad extremadamente pequeños, dada las grandes masas involucradas.



Según el modelo de la gota líquida, tras la colisión de una partícula externa el núcleo pesado se excita y se produce un estado de vibración que deforma la «gota» y provoca su «fisión».

Gueorgi a su despacho y le preguntó directamente por la energía necesaria en el caso de querer acelerar protones. Gamow sabía bien la respuesta: la penetrabilidad de la barrera de potencial nuclear es proporcional al número atómico del núcleo bombardeado y a la carga del proyectil e inversamente proporcional a la velocidad de este. Entonces, un protón que colisionara con un núcleo dado necesitaría 1/16 de la energía de una partícula α para producir el mismo efecto que esta. Rutherford se sorprendió de la simplicidad de la respuesta. A continuación llamó a Cockcroft y a Walton y les pidió: «Constrúyanme un acelerador de un millón de eV y podremos romper el núcleo de litio sin problemas». Y como ya hemos dicho antes, así lo hicieron y ganaron el premio Nobel por ello.

«¿Tan fácil? ¡Creía que tendrías que llenar un montón de páginas con tus malditas fórmulas!»

— **Rutherford, tras conocer la respuesta de Gamow sobre la energía necesaria para acelerar protones.**

Gamow, por contra, no consiguió avanzar en el argumento propuesto en el proyecto que le sirvió para obtener la beca: el entendimiento de los procesos de emisión β y γ nucleares. Empezó entonces a trabajar en el que se convertiría en su primer libro: *Constitución de núcleos atómicos y radiactividad*. Fue publicado por la editorial Clarendon Press en una serie de monografías de física que editaban el astrónomo británico Alfred Fowler y el físico ruso Piotr Kapitsa. Aunque el prefacio está firmado el 1 de mayo de 1931, el libro no apareció publicado hasta el otoño siguiente, al parecer debido a que tuvo que ser revisado en detalle para corregir el particular «inglés» que su autor manejaba por entonces. Gamow, lejos de dar una visión ortodoxa del estado del arte sobre la física nuclear, expresó sus opiniones, en algunos casos muy alejadas del modelo de estructura nuclear que entonces era aceptado por la mayoría. Uno de los puntos más llamativos en este sentido eran las dudas que, a lo largo del texto, Gamow expresó sobre la suposición de que los electrones eran partícu-

las constitutivas de todos los núcleos conocidos excepto el de hidrógeno (que estaba formado por un único protón). Para poner de manifiesto sus reparos ilustró el manuscrito con una calavera con dos huesos cruzados cada vez que aparecía tal hipótesis. En el libro publicado la editorial modificó el tétrico símbolo por una «S», indicando con ello que el autor lo consideraba especulativo.

La información incluida en el libro sobre el modelo de la gota líquida era básicamente la misma que figuraba en sus artículos publicados el año anterior, de manera que cabe pensar que no había hecho progresos al respecto. En cualquier caso, era uno de los primeros libros sobre el tema y la obra se convirtió casi inmediatamente en un punto de referencia sobre la física nuclear, que entonces se encontraba aún en una fase muy primitiva.

En el verano de 1930, Gueorgi partió de nuevo para Copenhague. Su beca en Cambridge se había terminado y Bohr había obtenido fondos para financiar una nueva estancia suya en su instituto. Gracias a la solicitud de Bohr al embajador soviético en Dinamarca, pudo prolongar su visado por otros seis meses.

ÚLTIMO RETORNO A RUSIA

Llegado el verano de 1931, Gueorgi no pudo alargar más su ausencia de la URSS y, siguiendo el consejo del embajador, volvió a su país con la idea de solicitar inmediatamente un nuevo visado para poder acudir a dos conferencias internacionales que se iban a celebrar inminentemente, una en Alemania y la otra en Italia, y para las que había recibido sendas invitaciones para presentar sus últimos resultados.

Sin embargo, la situación en su país había cambiado significativamente y, a diferencia de su anterior regreso, nadie saludó su llegada, ni se alegró con su presencia. Tampoco obtuvo el permiso de salida como esperaba, tal como le había asegurado el embajador. Así es que no solo tuvo que cancelar los planes que se había hecho para pasar todo el verano visitando con su moto varios países europeos, sino que, ya en Rusia, tuvo que

pelear con unos y otros para adivinar cuál era la situación de su solicitud. Lo que más llamó la atención de Gamow es que las nuevas autoridades soviéticas habían abandonado las «buenas relaciones» que habían mantenido con los científicos durante los primeros años tras la revolución, tiempos en los que hacían notar su orgullo cuando algún compatriota era invitado a algún país occidental. Ahora la ciencia formaba parte de la confrontación con el mundo capitalista, se había convertido en una traición relacionarse con los científicos foráneos y los pocos que salían tenían el encargo de «espiar» los logros occidentales sin, por supuesto, revelar un solo detalle de los progresos de la ciencia proletaria soviética. Además se vigilaba con suma atención

PIOTR LEONIDOVICH KAPITSA (1894-1984)

Piotr Kapitsa nació en Kronstadt, una ciudad cercana a San Petersburgo, el 8 de julio de 1984. En la Primera Guerra Mundial sirvió como conductor de ambulancias, lo que retrasó su graduación hasta 1918. A principios de la década de 1920 viajó a Cambridge, donde trabajó en el laboratorio Cavendish con Rutherford. Allí coincidió con Gamow. En 1927 se casó con Anna Alekseevna Krylova, hija del famoso matemático e ingeniero naval ruso Krylov. En 1929 ingresó en la Royal Society y ese mismo año, la Academia de Ciencias de la URSS lo nombró miembro correspondiente. Fue el primer director del laboratorio Mond, que la Royal Society instituyó a instancias de Rutherford, y que inició sus actividades en 1933. Dotado de una capacidad increíble para construir artilugios con variadas aplicaciones, fue capaz de generar campos magnéticos ultraintensos mediante un dispositivo que inyectaba una corriente muy alta durante un período de tiempo muy corto en unos electroimanes especiales. Durante su estancia en Cambridge estudió sistemáticamente el efecto de esos campos magnéticos en los distintos elementos de la tabla periódica. En 1934 regresó a Rusia para una breve visita, pero no pudo volver a salir. El Gobierno soviético creó el Instituto para los Problemas Físicos y compró parte del equipamiento experimental que había dejado en Inglaterra tras su marcha, lo que consiguió con la ayuda del propio Rutherford. Pudo así continuar en la línea de trabajo que inició en Cambridge sobre la física de bajas temperaturas. Ese mismo año fue capaz de desarrollar un procedimiento que permitía obtener helio líquido en cantidades suficientes para poder experimentar con él. En 1937 descubrió la superfluidez del helio líquido, efecto que también encontraron

cualquier desviación del materialismo dialéctico, la doctrina oficial imperante.

Un ejemplo bien conocido de esta época es la prohibición de la teoría de la relatividad porque negaba la existencia del éter, un elemento cuya existencia se deducía directamente de la adecuada aplicación del materialismo dialéctico. La mecánica cuántica se consideraba una teoría idealista y burguesa, que debía adaptarse a las enseñanzas del materialismo dialéctico, y era obligado usar y enseñar solo la mecánica ondulatoria de Schrödinger. Precisamente en dos episodios relacionados con estas teorías se vio envuelto Gueorgi sin que, por fortuna para él, tuvieran consecuencias demasiado graves. A su vuelta de Europa occidental su

los canadienses John F. Allen y Don Misener, entonces en el laboratorio Mond, ese mismo año. La superfluidez es un estado de la materia en el que esta se comporta como un fluido con viscosidad casi nula, lo que en el caso del helio (concretamente del ^{4}He) ocurre a una temperatura por debajo de 2,17 K. Los trabajos de Kapitsa en este campo le valieron el premio Nobel de Física en 1978 por sus «invenciones básicas y descubrimientos en el área de la física de las bajas temperaturas», galardón que compartió con Arno Allan Penzias y Robert Woodrow Wilson, los descubridores de la radiación de fondo de microondas cósmico.



Pintura de Borís Kustódiev (1921) que representa a Kapitsa (izquierda) junto con el también premio Nobel ruso Nikolái Semiónov.

estatus en la universidad de Leningrado había cambiado. Tenía un puesto como investigador en el Instituto Físico-Matemático de la Academia de Ciencias y le habían asignado tareas docentes en la universidad. Un día un colega, Bronstein (un físico teórico soviético que fue ejecutado en 1938 durante la Gran Purga orquestada por Stalin entre 1934 y 1940) les mostró a él y a Landau un ejemplar del último volumen de la *Gran Enciclopedia Soviética*. En ese volumen había un artículo sobre el éter lumínico de B. Gessen, un físico de formación dedicado a la historia y a la filosofía de la física, y que desde 1930 era director del Instituto de Física de la Universidad de Moscú del que era director científico el físico Mandelshtam. Gessen era muy amigo de Tamm, físico soviético, estudiante de Mandelshtam, que ganó el premio Nobel en 1958 junto con Cherenkov y Frank por el descubrimiento e interpretación del efecto Cherenkov-Vavilov. El artículo en cuestión había llamado la atención de Bronstein, ya que el concepto del éter había sido prácticamente erradicado de la física desde hacía algunos años, una vez aparecida la teoría de la relatividad de Einstein. Entonces, Landau, Bronstein, Ivanenko y Gamow, junto con dos estudiantes, enviaron a Gessen un telegrama de «felicitación» en tono de burla, no exenta de una cierta malicia, en el que le decían que, habiendo leído su excelente artículo, habían empezado a estudiar el éter con entusiasmo y que esperaban sus instrucciones sobre el *flogisto*, el *calórico* y los *fluidos eléctricos*. La reacción oficial fue mucho más virulenta de lo que esperaban: la Academia Comunista les acusó de contrarrevolucionarios y se vieron envueltos en un juicio. A pesar de que Gamow escribió una carta a Stalin tratando de defender su posición y de hacerle notar la situación en que se encontraba la física teórica debido a los continuos ataques por parte de los filósofos que se autodenominaban como materialistas, Landau y Bronstein fueron condenados y perdieron su trabajo como profesores del Instituto Politécnico, aunque mantuvieron su posición como investigadores en el Instituto del Radio. Por su parte, Gamow, cuyo puesto dependía de la Academia de Ciencias, quedó pendiente de ser investigado por esa institución, cosa que, si ocurrió, no le acarreó ninguna sanción.

En otra ocasión, Gamow fue invitado a impartir una serie de conferencias para una audiencia no especializada sobre la nueva teoría cuántica. Cuando empezó a hablar de las relaciones de incertidumbre de Heisenberg, uno de los filósofos materialistas de la Casa de Científicos, lugar donde se celebraba el evento, le interrumpió y despidió al público sin dejarlo terminar. Inmediatamente recibió instrucciones precisas para que no volviera a mencionar las relaciones de incertidumbre en sus intervenciones públicas.

LYUBOV VOKHMINZEVA

A todo esto, el congreso de Alemania ya había tenido lugar y Gueorgi esperaba ansiosamente su visado para ir al congreso de Roma, al que había sido invitado por Guglielmo Marconi. Mientras se resolvía la solicitud aprovechó para visitar a su padre y terminó de pasar el verano en Crimea. En septiembre volvió a Moscú para interesarse por su permiso, pero día tras día recibió negativas y, finalmente, también pasó el momento para poder viajar a Italia.

Fue en esas visitas diarias a la oficina de pasaportes cuando conoció a Lyubov Vokhminzeva, una joven graduada en Física en la Universidad de Moscú, con la que se casó en noviembre de 1931, un par de meses después de conocerse.

Enseguida Bohr volvió a invitar a Gamow a Copenhague para «poder discutir sobre importantes aspectos de física nuclear». Pero de nuevo la solicitud de visado le fue denegada, esta vez con el argumento de que su viaje perjudicaría sus clases en la universidad. Para entonces parecía claro que Lyubov y Gueorgi estaban retenidos en Rusia y que las posibilidades de salir eran más bien escasas, si no inexistentes. Y fue entonces cuando ambos empezaron a planear estrategias para poder escapar a Occidente. En su primer intento, en julio de 1932, se embarcaron en una piragua para atravesar el mar Negro y el episodio acabó como hemos relatado anteriormente. En enero del año siguiente pla-

nificaron una nueva intentona en la que tratarían de atravesar la frontera finlandesa, bien en trineo o bien esquiando. Inmediatamente fueron conscientes de que el viaje esquiando estaba más allá de sus capacidades físicas y la posibilidad del trineo se desvaneció cuando supieron que los guías aprovechaban para, una vez recibido el pago por su trabajo de conducción, llevar a sus pasajeros directamente al puesto fronterizo, donde recibían una cantidad adicional de dinero por la entrega. Un intento más fue proyectado para el siguiente verano, esta vez usando una lancha motora desde una estación biológica marina cercana a la frontera noruega. Pero cuando ya se encontraban en la estación, descubrieron que la Marina soviética estaba construyendo una base de submarinos en las cercanías y el centro de investigación estaba a punto de cerrar.

SALIDA DEFINITIVA DE LA URSS

De vuelta una vez más en Leningrado, se llevaron enseguida una grata sorpresa: el Gobierno había nombrado a Gamow delegado para asistir al Congreso Solvay de Física Nuclear, que debía celebrarse en Bruselas en octubre de aquel año. Gueorgi había sido invitado a impartir una conferencia sobre «La estructura y las propiedades de los núcleos atómicos». Después de tanto tiempo organizando planes para escapar, no daban crédito a lo que decía la carta que habían recibido, sin duda alguna oficial: le comunicaban que debía comparecer en *Narkompros*, el Comisariado Popular de Educación soviético, para recoger su pasaporte, su visado y el billete de tren.

Según relata en su autobiografía, Gamow no tenía en principio ningún interés en desertar y se habría sentido satisfecho de regresar a su país si no le hubieran puesto trabas para moverse libremente fuera de la URSS y mantener sus contactos científicos con colegas de otras partes del mundo. Pero la opresión que sentía por parte de la filosofía del materialismo dialéctico era demasiado fuerte para él, que «no quería ser enviado a un campo

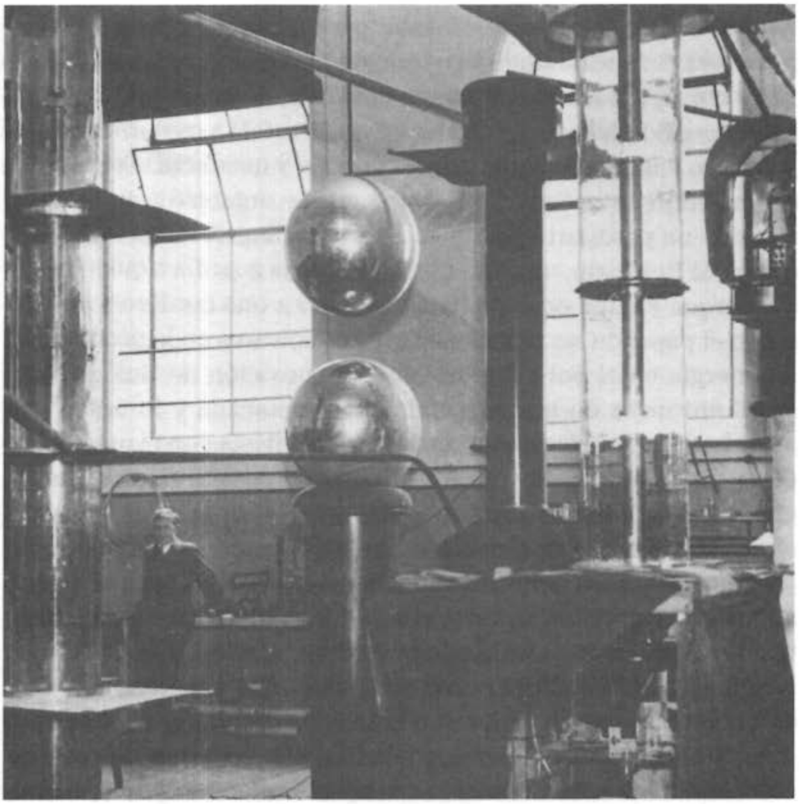




FOTO SUPERIOR:
John Cockcroft en el laboratorio Cavendish, junto al acelerador de partículas, que supuso un gran avance para la experimentación en el campo de la física nuclear.

FOTO INFERIOR:
John Cockcroft (izquierda) y Gueorgi Gamow trabajaban en el laboratorio Cavendish de Cambridge, dirigido por aquel entonces por Rutherford. La teoría del efecto túnel planteada por Gamow mostró el camino para que Cockcroft y Ernest Walton construyeran el primer acelerador de protones, por lo que recibieron el premio Nobel de Física en 1951.

de concentración en Siberia debido a mi visión sobre el éter, el principio de incertidumbre cuántico o la herencia cromosómica». Algo que seguramente hubiera ocurrido tarde o temprano de haber seguido allí.

Pero, claro, él no quería ir a Bruselas y quedarse allí solo, sin que su mujer lo acompañase. Así es que se organizó para obtener también un pasaporte para ella. En primer lugar, visitó en Moscú a Nikolai Bukharin, un comunista de la vieja guardia a quien conocía porque en una ocasión había asistido a una conferencia suya sobre el papel de las reacciones termonucleares en la producción de energía en el Sol y las estrellas. La posición de Bukharin en aquel entonces no era especialmente destacada y lo único que pudo hacer por él fue concertarle una entrevista con el presidente de la URSS, Vyacheslav Molotov. Gueorgi cuenta en su autobiografía que el día acordado fue conducido al despacho de Molotov, quien se interesó por el tema de su conferencia en Bruselas y le preguntó a qué se debía su visita. Gamow le dijo que quería que su mujer lo acompañase a la conferencia; le confesó que podría haber argumentado que, dado que ella era también graduada en Física, ejercería como su secretaria, pero que la verdad era bien distinta: dado que su esposa no había estado nunca en el extranjero, había pensado visitar con ella París tras la conferencia para que conociera el Museo del Louvre y el Folies Bergère y, ¡cómo no!, para que hiciese algunas compras. Molotov, divertido con la sinceridad de Gamow, le prometió que en octubre tendría los dos pasaportes listos.

Al parecer, la cuestión no fue tan sencilla. Cuando volvió a recoger la documentación, un funcionario le dijo que el visado de Lyubov se había denegado. Le explicó a Gueorgi que si se lo dieran se crearía un precedente, ya que todas las esposas de los científicos que salieran del país querrían ir con ellos y eso no podía permitirse. Pero envalentonado por las promesas de Molotov, echó un órdago al funcionario y le dijo que no iría a Bruselas si no estaban los dos pasaportes listos. Al cabo de algunos días, y a pesar de que Gamow esperaba que lo detuvieran por rechazar el encargo gubernamental de actuar como representante suyo en el congreso con el propósito, según supo después, de mantener

unas relaciones científicas cordiales con los franceses, los dos pasaportes estaban preparados y un día de mediados de octubre de 1933, los Gamow abandonaron definitivamente la URSS. En tren, llegaron primero a Helsinki, después a Copenhague y, finalmente, a Bruselas.

CAPÍTULO 3

El modelo del Big Bang

Una vez finalizado el Congreso Solvay, Gamow empezó a buscar un puesto de trabajo. Tras una etapa en la que estuvo en París y, de nuevo, en Cambridge y Copenhague, visitó la Universidad de Michigan para impartir un curso, y de allí pasó a Washington, en cuya universidad fue contratado como profesor y donde ejerció durante veintidós años. En ese período los intereses de Gamow se movieron entre la teoría estelar y la cosmología, campos en los que, como en el caso de la física nuclear, hizo contribuciones más que notables.

El primero de abril de 1948 apareció publicada en la revista *The Physical Review* una carta al editor con el sugerente título de «El origen de los elementos químicos», firmada por Alpher, de la Universidad Johns Hopkins, Bethe, de la Universidad Cornell, y Gamow, de la Universidad George Washington. En realidad, el trabajo que se describe en ese breve artículo había sido realizado por Gamow y Alpher, a la sazón su estudiante de doctorado, sin que, al parecer, Bethe hubiera intervenido en ninguna parte de la investigación ni de la redacción del mismo y sin que él supiera nada al respecto. La razón de incluir a Bethe como autor fue una broma más de las que tanto gustaban a Gamow. Siendo autores Alpher, Bethe y Gamow, sus iniciales coincidirían con las de los tres procesos básicos de emisión radiactiva conocidos (α-β-γ), que a su vez coinciden con las tres primeras letras del alfabeto griego, lo que resultaba especialmente divertido para Gueorgi. Así es que propuso a Alpher incluir a Bethe como coautor, aunque este no estuvo de acuerdo. Con buen criterio, pensó que la presencia de Bethe, entonces ya un reputado físico, no daría relieve al hecho de que lo que allí aparecía era principalmente trabajo suyo. Pero finalmente aceptó la propuesta de Gamow. Bethe apreció la broma con buen humor, pero Gueorgi comentó en algún momento que cuando la teoría desarrollada en el artículo había caído en el olvido, «el Dr. Bethe había pensado seriamente cam-

biar su apellido por el de Zacharias». Gamow trató de que otro de sus colaboradores, Herman, cambiara su apellido por Delter, para continuar el juego con la letra δ, pero no lo consiguió. No obstante, en un artículo titulado «Sobre cosmología relativista», que apareció en 1949 en un número especial de *Review of Modern Physics* dedicado al 70° aniversario de Einstein, Gamow señaló: «La teoría de la captura neutrónica del origen de las especies atómicas recientemente desarrollada por Alpher, Bethe, Gamow y Delter sugiere que...». Incorregible.

EN BUSCA DE TRABAJO

La participación de Gamow en el XIII Congreso Solvay no fue especialmente relevante. Seguramente el tiempo transcurrido desde que regresó a la URSS en 1931 hasta aquel momento, y los variados problemas a los que había prestado su atención, lo habían alejado de la investigación de primera fila en la que había estado inmiscuido durante su estancia en Cambridge. Así es que su charla sobre la radiación γ no parece que despertara gran interés entre los asistentes.

Una vez concluido el congreso, empezó la tarea de buscar un puesto de trabajo con alguna perspectiva de futuro y, más a corto plazo, donde vivir durante el invierno que ya se avecinaba. Una vez más se dirigió a Bohr con la seguridad de que, como en ocasiones anteriores, le resolvería el problema. Pero Bohr le conminó a que regresara a la URSS. Según le dijo entonces, el profesor Langevin (1872-1946), un reputado físico francés organizador del congreso, que mantenía por sus convicciones políticas una buena sintonía con las autoridades soviéticas, había intercedido ante estas para que Gueorgi fuese enviado como representante de la URSS a Bruselas, y seguramente esa fue la razón de que hubiera obtenido los visados con la relativa facilidad con que los consiguió. Bohr le insinuó que Langevin había empeñado su palabra y que, por tanto, no le quedaba otra que regresar. Pero en tan peliaguda tesitura, a Gamow le sonrió una vez más la fortuna:

invitado junto con otros participantes del congreso a una cena en casa de los Curie, le confió todas sus penas a Marie Curie y ella se comprometió a hablar con Langevin al día siguiente. Marie cumplió su palabra y, además, ofreció a Gueorgi una beca por dos meses en el Instituto Pierre Curie de la Sorbona. A esta estancia en París siguieron sendas visitas al laboratorio Cavendish y al instituto de Bohr en Copenhague. A principios del verano, los Gamow se embarcaron hacia Estados Unidos, pues Gueorgi había aceptado impartir una serie de conferencias en un curso de la Universidad de Michigan. Gamow esperaba que durante las seis semanas que duraba el curso surgiría alguna oferta, pero no ocurrió así. Al parecer E.O. Lawrence, físico experimental estadounidense, premio Nobel de Física en 1939 por la invención del ciclotrón, intentó sin éxito encontrar acomodo para él en la Universidad de Berkeley.

> «Es bien sabido que los físicos teóricos no pueden manejar equipo experimental, porque se rompe en cuanto lo tocan.»
>
> — Gueorgi Gamow.

Hacia finales de septiembre, cuando ya estaba pensando en volver de nuevo a Europa, tuvo la oportunidad de visitar Washington para impartir un seminario sobre teoría nuclear en la *Carnegie Institution*. El seminario lo había organizado Merle A. Tuve (1901-1982), un geofísico amigo de Lawrence que por aquel entonces había construido un acelerador Van de Graaf de protones en el Departamento de Magnetismo Terrestre de la Carnegie. Tuve había pensado que Gamow podría serles muy útil con la interpretación de los resultados experimentales que produciría el acelerador y convenció a C.H. Marvin, presidente de la Universidad George Washington, de que le ofreciera un puesto de profesor. La razón última del seminario era pues comprobar *in situ* la valía de Gamow como físico.

Tuve consiguió su objetivo con relativa facilidad. Marvin quería que la «física moderna» se iniciara en su universidad y Tuve le hizo notar que era mucho más «barata» la física teórica

(que en definitiva solo requería papel y lápiz y algo de dinero para viajes y conferencias) que la experimental. Marvin ofreció a Gamow una plaza de profesor visitante, le prometió una cátedra en cuanto fuera posible y accedió a los dos requisitos que pidió Gueorgi para aceptar: contratar a un físico teórico que él mismo elegiría y darle apoyo institucional y económico para organizar una conferencia anual a la que pudieran asistir los líderes mundiales en las temáticas específicas. Así, en otoño de 1934 se incorporó a la Universidad George Washington y al año siguiente, en abril, se celebró la primera de las conferencias internacionales, que se dedicó a discutir los problemas vigentes en física nuclear. Entre los asistentes cabe destacar a Bethe, Dirac, Uhlenbeck, Bartlett, Feenberg, Inglis, Szilard, Lande, Breit, Goudsmit, Lawrence, Condon, Nordheim y Rabi, además de Gamow, Teller y Tuve.

ÚLTIMA CONTRIBUCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR

Coorganizador de las conferencias de física teórica fue también desde el principio el físico húngaro Edward Teller, que trabajó en la Universidad George Washington entre 1935 y 1941. Él fue precisamente a quien Gamow eligió para que lo acompañara en la etapa recién iniciada en América. Se habían conocido en Copenhague en 1933 y se hicieron muy amigos desde el principio. En 1934, Teller enseñaba química en la Universidad de Londres y, al mismo tiempo que la invitación de Gamow, recibió otra de otros dos buenos y antiguos amigos suyos, Wigner y Von Neumann, para un puesto en Princeton, pero se decidió por la primera. Gamow contaba entonces apenas treinta años y Teller tan solo veintiséis.

Durante los dos años siguientes, Gamow y Teller colaboraron en cuestiones relacionadas con la física nuclear básica y más concretamente con las características de la desintegración β. Su aportación más relevante data de 1936, año en el que publicaron un trabajo titulado «Reglas de selección para la desintegración β»

EDWARD TELLER (1908-2003)



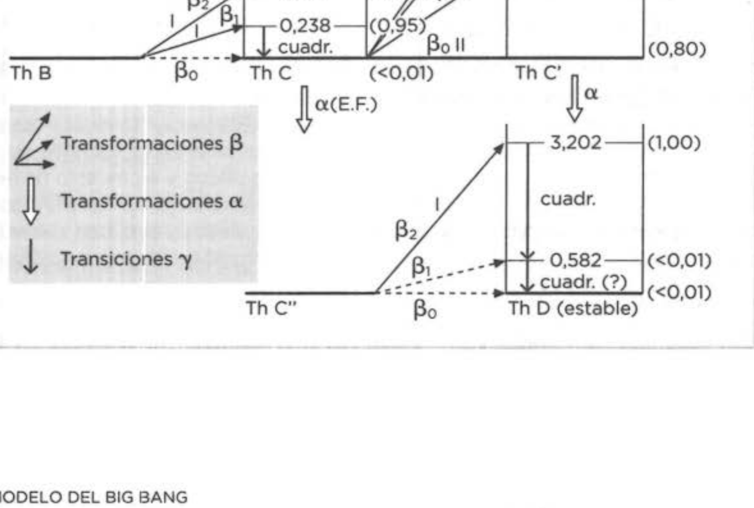
Edward Teller nació en 1908 en Budapest, en una familia judía, hijo de un abogado y una pianista. Desde muy joven mostró aptitudes para las matemáticas. Salió de Hungría por motivos políticos en 1926, licenciándose en Ingeniería Química en la Universidad de Karlsruhe y doctorándose en 1930 en la Universidad de Leipzig con un trabajo sobre el tratamiento cuántico del ión molecular de hidrógeno, que realizó bajo la dirección de Heisenberg. En 1933 consiguió escapar de Alemania y recaló en Copenhague, donde trabajó durante un año con Bohr. Entre 1935 y 1941 colaboró con Gamow en la Universidad George Washington. En esos años realizó importantes contribuciones en física y química, entre las que cabe señalar el efecto Jahn-Teller (que se corresponde con la modificación de la geometría de algunas moléculas debido a la configuración electrónica que presentan), la teoría de Brunauer-Emmett-Teller (que explica la adsorción de moléculas de gas en superficies sólidas) y las reglas de selección de Gamow-Teller (que extendían la teoría de Fermi de la desintegración β).

La bomba de hidrógeno

Participó desde casi sus inicios en el Proyecto Manhattan para la fabricación de la bomba nuclear estadounidense. En 1946 se trasladó a la Universidad de Chicago, donde trabajó con Fermi e impulsó el proyecto que más famoso lo hizo: la bomba de hidrógeno. Tras la primera prueba nuclear soviética en 1949, el presidente Truman inició un programa para la elaboración de la bomba de fusión. Teller trabajó con el físico polaco S.M. Ulam y llevaron a cabo el primer diseño del artefacto, que data de 1950. En 1954 testificó en contra de Oppenheimer en un proceso de deslealtad con el Estado que se incoó contra el que había sido director científico del Proyecto Manhattan. Tras este episodio fue relegado por la mayoría de la comunidad científica y se dedicó a labores de asesoramiento para el Gobierno y el ejército estadounidense, mostrándose siempre como un ardiente defensor de la carrera armamentista y abogando por el desarrollo del programa nuclear (militar y civil) y de las correspondientes pruebas en la atmósfera. Participó activamente en comités de estudio del uso de explosivos nucleares para fines pacíficos y se mostró firme partidario de la «Guerra de las Estrellas», la iniciativa de defensa estratégica basada en láseres, haces de partículas y misiles para destruir posibles misiles soviéticos que impulsó el presidente Reagan. Teller murió en Stanford, California, en septiembre de 2003.

en la revista *The Physical Review*. En esa obra generalizaban la teoría que Fermi había desarrollado unos años antes para explicar los resultados experimentales disponibles en relación a ese tipo de desintegración radiactiva. Como se ha visto anteriormente, en la desintegración β un protón de un núcleo se transforma en un neutrón, o viceversa, emitiéndose un positrón y un neutrino (desintegración β^+), en el primer caso, y un electrón y un antineutrino (desintegración β^-), en el segundo. Según Fermi, el protón y el neutrón involucrados en el proceso (así como el resto de nucleones de los núcleos padre e hijo) serían meros espectadores del proceso de desintegración y, aparte del cambio en la carga, los restantes números cuánticos no sufrirían ninguna modificación. En particular, el denominado *momento angular total* del núcleo permanecería invariable. Gamow y Teller analizaron la cadena radiactiva de desintegración del entonces denominado Th-B (hoy conocido como ^{212}Pb). Mediante desintegración β^- (figura 1) el Th-B pasa a Th-C (^{212}Bi), poblándose dos de sus estados excitados. Estos se desexcitan emitiendo radiación γ hasta alcanzar el estado fundamental. A continuación, el Th-C se desintegra por

FIG. 1



Representación esquemática de las desintegraciones α y β del Th B al Th D adaptada del trabajo original de Gamow y Teller. Se muestran las energías de excitación de los distintos niveles excitados de cada núcleo, así como las probabilidades de transición β a esos niveles (números entre paréntesis).

un lado mediante desintegración α a Th-C'' (^{208}Tl) y por otro mediante β^- a Th-C' (^{212}Po), poblando de nuevo estados excitados de este núcleo. La cadena se cierra con la desintegración β^- del Th-C'' y la desintegración α del Th-C', ambos a Th-D, que es en realidad ^{208}Pb, un isótopo estable del plomo.

Gamow y Teller se dieron cuenta de que la hipótesis de Fermi no permitía describir correctamente los valores experimentales de los momentos angulares de los estados nucleares involucrados en esa cadena radiactiva. En su artículo desarrollaron la teoría suponiendo que protones y neutrones jugaban un papel en el proceso y encontraron que entonces eran posibles otras transiciones, en las que el momento angular de los estados nucleares involucrados podía cambiar en ± 1 (el momento angular se «mide» en unidades de $h/2\pi$, donde h es la constante de Planck). Esto equivale a que el electrón y el neutrino son emitidos de forma tal que sus espines están paralelos, mientras que en la hipótesis de Fermi esos espines estarían antiparalelos. Teniendo en cuenta estas nuevas transiciones, la información experimental de la mencionada cadena del torio podía describirse de manera correcta. Las nuevas transiciones se conocen desde entonces como *transiciones Gamow-Teller* y en muchos de los procesos de desintegración β compiten con las de tipo Fermi. Por ejemplo, la desintegración β^- del neutrón libre es un 82% de tipo Gamow-Teller y un 18% de tipo Fermi.

En abril de 1937 apareció publicada la segunda edición de su monografía sobre física nuclear, que incluía un cambio de título: *Estructura de núcleos atómicos y transformaciones nucleares*. Sin embargo, Gamow no expresaba en el prefacio del libro el mismo entusiasmo hacia los «puntos calientes» de la física nuclear que en la primera edición, señal inequívoca de que algo estaba cambiando en sus intereses científicos.

LA ATRACCIÓN DE LAS ESTRELLAS

Muy probablemente, las mismas razones que le hicieron dedicarse a la física nuclear tras su llegada a Gotinga fueron las que le empu-

jaron a abandonar la física nuclear básica y reconducir sus intereses hacia la astrofísica nuclear y la cosmología: los cálculos que se hacían en física nuclear empezaban a ser demasiado complicados para su gusto y habilidades.

Tras la primera conferencia de 1935, Gamow, Tuve y Teller habían dedicado las de los años 1936 y 1937 a la Física Molecular y a los Problemas de Partículas Elementales y Física Nuclear, respectivamente. Pero cuando empezaron a organizar la de 1938, Gamow tuvo claro que quería desarrollar el tema de la relación entre los procesos nucleares y la energía de las estrellas. Estaba seguro de que la solución debía de estar en algunas reacciones nucleares específicas que permitirían explicar la producción energética que alimentaba a las estrellas. La cuestión no era nueva, sin embargo. Ya en 1925, Eddington, en un libro titulado *La constitución interna de las estrellas*, había avanzado la hipótesis de que era la conversión de hidrógeno en helio la responsable de la energía interna del Sol y otras estrellas.

«Gamow fue excepcional en sus ideas. Ya tuviera razón o estuviera equivocado. Más a menudo se equivocó que acertó. Pero siempre interesante; y cuando su idea no era incorrecta, no solo era cierta, era nueva.»

— Edward Teller.

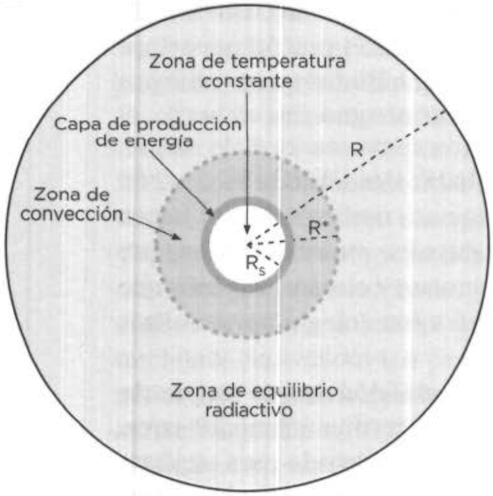
A Gamow esa visión del problema tampoco le era ajena. En marzo de 1929, su amigo Houtermans, junto con el físico y astrónomo británico Robert d'Escourt Atkinson, estaban estudiando la posibilidad de que la energía liberada en las estrellas podría deberse a colisiones violentas entre núcleos, que estarían favorecidas por las altas temperaturas existentes en ellas. Escribieron a Gamow para que les ayudara con los cálculos y acordaron encontrarse en una estación de esquí en los Alpes austríacos. El problema con el que Houtermans y Atkinson se habían topado era determinar la probabilidad de que un protón entrara en un nú-

cleo ligero, fuera capturado por este y el exceso de energía fuera emitido en forma de radiación γ. Evidentemente, la base de todo el proceso residía en la posibilidad de que el protón penetrara en el núcleo gracias al efecto túnel, del que Houtermans sabía por sus conversaciones con Gamow en Copenhague. Sin embargo, el desconocimiento que en ese momento existía acerca de la estructura real de los núcleos (aún no se había descubierto el neutrón y se consideraba, no sin que ello originase numerosos problemas en la interpretación de algunos resultados experimentales, que el núcleo estaba constituido por protones y electrones) hizo que las dos hipótesis que Gamow planteó a sus colegas para realizar el cálculo fuesen erróneas.

Por un lado, para calcular la probabilidad de que un protón colisionara en las condiciones estelares con un núcleo, utilizaron la misma expresión que Gamow había considerado para explicar los experimentos de Rutherford de colisión de partículas α con núcleos, y según la cual esa probabilidad es del orden del cuadrado del diámetro nuclear. Sin embargo, lo correcto habría sido utilizar el cuadrado de la longitud de onda de De Broglie de las partículas que actúan como proyectiles. Mientras que la longitud de onda de De Broglie de las partículas α era del orden del diámetro nuclear, la de los protones acelerados a la temperatura estimada de las estrellas, unos 20 millones de grados, era 100 veces mayor, por lo que el resultado correcto había sido subestimado en un factor 10 000. Pero por otro lado, les aconsejó utilizar la fórmula de emisión dipolar de Thomson, que correspondía a la suposición de que la emisión de radiación se debía al hecho de tener en el núcleo cargas opuestas que oscilaban. En realidad, la emisión real es de tipo cuadrupolar, cuya intensidad es menor que la de la emisión dipolar en un factor 10 000 y, por tanto, la estimación de Houtermans y Atkinson habría sobrevalorado el resultado correcto en ese factor. Por casualidad, pues, uniendo los dos errores, la predicción que Houtermans y Atkinson publicaron ese mismo año en *Zeitschrift für Physik* resultó correcta.

A partir de ese momento Gamow no dejó de estudiar con una cierta asiduidad el problema de la producción de energía estelar. Por ejemplo, en 1933, el año en que abandonó definiti-

FIG. 2



Representación esquemática del modelo de estrella con una capa de producción de energía.

vamente la URSS, publicó en *Nature* junto a su amigo Landau un artículo titulado «Temperatura interna de las estrellas», en el que, usando los resultados de Atkinson y Houtermans, estimaban el límite superior de la temperatura en el interior de las estrellas. Pero fue después de llegar a Washington cuando empezó a considerar seriamente dedicarse en profundidad al tema.

De hecho, justo antes de celebrarse la cuarta conferencia, en diciembre de 1937, completó dos trabajos, el primero titulado «Un modelo estelar con fuente termonuclear selectiva», publicado en la revista *Astrophysical Journal*, y el segundo, «Fuentes de energía nuclear y evolución estelar», aparecido en *The Physical Review*. En ambos trabajos Gamow argumentó acerca de las implicaciones que tendría, en cuanto a la producción de energía en las estrellas, que las reacciones ocurriesen con mayor probabilidad cuando los protones tuvieran una energía menor que en el centro de la estrella, debido a que la temperatura fuera más baja que la existente en esa zona.

El modelo entonces admitido, el «modelo de la fuente puntual», establecía que la mayor parte de la generación de energía tenía lugar en las cercanías del centro de la estrella, donde la temperatura y, por tanto, la velocidad de los protones eran más altas. Aunque entonces no encontró ninguna reacción que fuera buena candidata para confirmar su hipótesis, sí que analizó las consecuencias que, de existir, tendría. Y la conclusión fue que en tal caso la producción de energía ocurriría prevalentemente en una capa esférica situada a una cierta distancia del centro y con una cierta anchura (figura 2), cantidades que vendrían es-

tablecidas por la temperatura crítica a la que la reacción fuera más probable. Además, con esa estructura, la estrella no tendría problemas de estabilidad.

LA CONFERENCIA DE WASHINGTON DE 1938

Del 21 al 23 de marzo de 1938 se celebró la cuarta Conferencia de Física Teórica, bajo el título de «Energía estelar y procesos nucleares», y para que el éxito estuviera asegurado, Gamow se esforzó en convertir esa edición en un encuentro interdisciplinar en el que especialistas en el problema de la constitución interna de las estrellas, como Chandrasekhar, Menzel, Sterne y Strömgren, se «vieran las caras» con investigadores del campo de los procesos nucleares, como Bethe, Breit, Hafstad, Neumann y los propios Gamow, Teller y Tuve.

Para desilusión de Gamow, nadie en la conferencia pareció mostrar interés por su modelo de máxima producción energética en una capa esférica interna de las estrellas y, en consecuencia, tampoco se discutió acerca de cuál podría ser la reacción nuclear «mágica» que presentara las propiedades que el modelo requería para producir resultados satisfactorios. Pero como resultado de las discusiones se produjo un hecho que cambiaría la visión que hasta entonces se tenía de la producción de energía en las estrellas: Bethe entró de lleno en el problema y en unos pocos meses encontró una excelente solución que daba cuenta de los resultados experimentales conocidos hasta entonces. El trabajo que llevó a cabo nada más volver a la Universidad Cornell le valió el premio Nobel de Física, concedido en 1967 por sus contribuciones a la teoría de las reacciones nucleares, en especial por sus descubrimientos relativos a la producción de energía en las estrellas. En su autobiografía, Gamow cuenta que cuando asistió a la conferencia de 1938 Bethe «no sabía nada acerca del interior de las estrellas y sabía todo sobre el interior del núcleo». De hecho, inicialmente había pensado en no asistir debido a que el tema no le interesaba y fue precisamente Teller quien lo convenció para que lo hiciera.

Este «convencimiento de última hora» resultó sin duda más que «productivo».

Esencialmente Bethe identificó los dos ciclos de reacciones de fusión que son responsables de la producción de energía estelar. El primero, el ciclo protón-protón (p-p), había sido inicialmente sugerido por Charles Critchfield, un estudiante de

LOS CICLOS DE PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN LAS ESTRELLAS

Dos son los ciclos básicos que proporcionan la energía en las estrellas: el ciclo p-p y el C-N-O. Ambos fueron analizados por Bethe en 1938. El ciclo p-p comienza con la reacción:

$$^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H + e^{+} + \nu,$$

que es poco probable porque está mediada por la formación de un núcleo de ^{2}He que se desintegra β^{+} a ^{2}H (aunque lo más probable es que lo haga a dos protones). Esta reacción compite con la siguiente:

$$^{1}H + e^{-} + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}H + \nu,$$

que tiene una probabilidad unas 400 veces menor, pero tiene más energía disponible para los productos de la misma. En un segundo paso, el deuterón producido se fusiona con otro protón según:

$$^{2}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma.$$

A partir de este punto pueden darse las cuatro vías diferentes que se muestran en la tabla siguiente, donde también se indica el rango de temperaturas en que cada una de ellas domina la producción energética estelar:

Ciclo p-p		
Vía	Reacciones	T (millones de grados)
I	$^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + {}^{1}H + {}^{1}H$	10-14
II	$^{3}He + {}^{4}He \rightarrow {}^{7}Be + \gamma$ $^{7}Be + e^{-} \rightarrow {}^{7}Li + \nu$ $^{7}Li + {}^{1}H \rightarrow {}^{4}He + {}^{4}He$	14-23
III	$^{3}He + {}^{4}He \rightarrow {}^{7}Be + \gamma$ $^{7}Be + {}^{1}H \rightarrow {}^{8}B + \gamma$ $^{8}B \rightarrow {}^{8}Be + e^{+} + \nu$ $^{8}Be \rightarrow {}^{4}He + {}^{4}He$	>23
IV	$^{3}He + {}^{1}H \rightarrow {}^{4}He + e^{+} + \nu$	—

doctorado de Teller que colaboraba también con Gamow. Critchfield había encontrado dificultades al hacer los cálculos correspondientes y aprovechó la presencia de Bethe en la conferencia para contarle cuál era la situación de los mismos. Bethe, mucho más ducho con las matemáticas que Gamow, resolvió el problema y publicó, junto a Critchfield, un artículo titulado «La formación

En el Sol, cuya temperatura es de unos 15 millones de grados, la vía dominante es la I, en la que se producen unos 25 MeV de energía, que se reparten en forma de energía cinética de los productos de la reacción. La vía III tiene una probabilidad de solo el 0,11% de producirse en el Sol, pero resultó fundamental para poder explicar el problema de los neutrinos solares. Por último, la vía IV no se ha observado en el Sol. Las reacciones del ciclo C-N-O son más complejas y en ellas el carbono, el nitrógeno y el oxígeno ejercen como catalizadores. En todas ellas la reacción neta es:

$$^{1}H + {}^{1}H + {}^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{4}He + e^{+} + e^{+} + \nu + \nu + \gamma + \gamma + \gamma.$$

Existen dos grupos de reacciones, uno correspondiente al ciclo «frío» y otro al «caliente». En el primero se incluyen 4 vías de reacción, caracterizadas por capturas de protones y desintegraciones β^{+}. Las escalas temporales de las primeras son mucho mayores que las de las segundas y entonces estos ciclos convierten hidrógeno en helio de manera lenta, asegurando la producción de energía durante un tiempo prolongado. Si la temperatura y la presión aumentan, la tasa de captura protónica supera la de desintegración β^{+} y se presenta el ciclo «caliente», que incluye 3 vías de reacción. En la tabla siguiente se muestran las reacciones de la primera vía de ambos ciclos. Como vemos, comienzan con la captura de un protón por un ^{12}C y acaban con ^{4}He + ^{12}C.

Ciclo C-N-O (vía I)	
Frío	**Caliente**
$^{12}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{13}N + \gamma$	
$^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e^{+} + \nu$	$^{13}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{14}O + \gamma$
$^{13}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{14}N + \gamma$	$^{14}O \rightarrow {}^{14}N + e^{+} + \nu$
$^{14}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{15}O + \gamma$	
$^{15}O \rightarrow {}^{15}N + e^{+} + \nu$	
$^{15}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He$	

HANS ALBRETCH BETHE (1906-2005)



Bethe nació en 1906 en Estrasburgo, entonces perteneciente a Alemania. Completó su educación secundaria en 1924, año en el que ingresó en la Universidad de Frankfurt para estudiar la carrera de Química. Aconsejado por un profesor, se trasladó en 1926 a la Universidad de Múnich, donde se doctoró con Sommerfeld en 1928. Ese curso académico trabajó como asistente en Frankfurt y al año siguiente lo hizo en la Escuela Técnica Superior de Stuttgart, donde escribió uno de sus trabajos más importantes: «La teoría del paso de rayos corpusculares rápidos a través de la materia», publicado en 1930 en *Annalen der Physik*. En ese artículo Bethe obtuvo una expresión simplificada de la pérdida de energía por unidad de longitud recorrida en problemas de colisión de partículas con medios materiales, que se conoce aún hoy día como la *fórmula de Bethe*. Obtuvo una beca de la Fundación Rockefeller y durante 1930 realizó una estancia posdoctoral en el laboratorio Cavendish de Cambridge. Durante esa estancia desarrolló la versión relativista de la fórmula de Bethe. En 1935 consiguió una plaza de profesor en la Universidad Cornell, Estados Unidos, donde permaneció hasta su muerte en 2005.

Astrofísica

En 1938 participó en la cuarta Conferencia de Washington de Física Teórica y a raíz de ello encontró los ciclos de reacciones de fusión responsables de la producción de energía en las estrellas, lo que le valió el premio Nobel de Física en 1967. En 1947 publicó un artículo de dos páginas en el que daba cuenta del «desplazamiento Lamb», un hecho experimental que el físico W. Lamb y su estudiante R. Retherford habían descubierto recientemente y según el cual el estado fundamental del átomo de hidrógeno está desdoblado en dos niveles entre los que hay una pequeña diferencia de energía de la que la teoría de Dirac no daba cuenta. Bethe dio una explicación teórica e, indirectamente, salvó la teoría de la electrodinámica cuántica que había sido puesta en tela de juicio por ese experimento. En los últimos años de su vida trabajó activamente en problemas de astrofísica, en concreto en dinámica de supernovas, agujeros negros y estrellas de neutrones y ayudó a entender el problema de los neutrinos solares y el mecanismo de oscilación entre los neutrinos electrónicos y muónicos. Con 90 años aún se mostró entusiasmado con un proyecto de observación de ondas gravitacionales puesto en marcha en 1996.

de deuterones por combinación de protones», que apareció en *The Physical Review* en junio. Poco después Bethe encontró el segundo, el ciclo carbono-nitrógeno-oxígeno (C-N-O), y publicó «Producción de energía en estrellas» en *The Physical Review* en 1939. Ambos ciclos, que incluyen varias reacciones nucleares de fusión, finalizan con la formación de ^{4}He y además producen energía. Mientras que en el ciclo p-p, en la reacción inicial los protones se fusionan para, después de tener lugar una desintegración β^{+}, producir deuterones (núcleos de ^{2}H), en el ciclo C-N-O, carbono, nitrógeno y oxígeno juegan el papel de catalizadores de las distintas reacciones. De que en las estrellas se dé uno u otro depende el brillo de las mismas y está relacionado con la masa específica de cada estrella concreta. El ciclo p-p es el que domina en las estrellas con masa igual o menor a la del Sol, menos brillantes que estrellas más masivas, como por ejemplo Sirio, en las que el ciclo C-N-O es el principal responsable de la producción energética.

Gamow bromeó en alguna ocasión diciendo que él había jugado, en la historia de las fuentes nucleares de la energía de las estrellas, un papel de catalizador, igual que el carbono en el ciclo de Bethe: lo había gestionado todo, pero se había quedado como al principio. Era otra exageración de las suyas. Baste como ejemplo citar que en abril de 1938, Teller y él publicaron «La tasa de las reacciones termonucleares selectivas», una breve carta al editor de *The Physical Review* en la que actualizaban los cálculos que casi diez años antes habían llevado a cabo Houtermans y Atkinson con ayuda de Gamow. A la luz de los nuevos conocimientos sobre física nuclear adquiridos durante ese decenio, los resultados de aquellos debían modificarse significativamente y, aunque los de Gamow y Teller no pudieron considerarse como definitivos (los cálculos correctos fueron los realizados por Bethe y Critchfield), este trabajo supuso un nuevo hito en la explicación de los procesos de generación de energía en las estrellas, y fue mencionado por Bethe en su lección en la ceremonia de concesión del premio Nobel de 1967.

El ciclo C-N-O había sido descubierto también, de manera independiente, por el físico alemán Von Weizsäcker, que en 1938 publicó en *Physikalische Zeitschrift* la segunda parte de un trabajo titulado «Sobre transmutaciones de elementos en estrellas»,

en el que discutía los procesos involucrados en el mismo. Cuando Bethe recibió el premio Nobel en 1967, Von Weizsäcker fue olvidado: seguramente no se le perdonó su participación activa durante la Segunda Guerra Mundial en el programa nuclear alemán, bajo la dirección de Heisenberg.

EVOLUCIÓN ESTELAR

A partir de que Bethe hizo sus publicaciones sobre los ciclos p-p y C-N-O, Gamow dio por buena su explicación de la producción de energía estelar y desvió su atención hacia otros aspectos de la astrofísica. Durante los siguientes años se dedicó a estudiar, desde un punto de vista teórico, la evolución de gigantes rojas, enanas blancas, novas, supernovas y cómo su dinámica influía en la evolución estelar global.

Como en otros temas, la imaginación de Gamow era excepcional, y Teller, que colaboró con él hasta que inició sus trabajos en el Proyecto Manhattan, una vez comenzada la Segunda Guerra Mundial, recordaba que muchos días lo despertaba con su última idea feliz que, las más de las veces, no resistía un análisis concienzudo. En otras ocasiones, sin embargo, sus aportaciones fueron también notables. Un ejemplo de ello lo constituyen sin duda los *procesos urca*.

El verano de 1939, la familia Gamow (Lyubov, George y su hijo Rustem Igor) estuvo de vacaciones en Río de Janeiro (Brasil). Entre otros, conocieron a un joven físico teórico brasileño apellidado Schoenberg (1914-1990) que enseguida congenió con Gamow. Este, a su vuelta a Washington, agenció para él una beca Guggenheim y Schoenberg pasó un año colaborando con Gamow en problemas de astrofísica nuclear. Una de las cuestiones que trataron de entender fue el proceso que rige las supernovas: ¿qué mecanismos nucleares podían ser responsables de, o al menos contribuir a, esas espectaculares emisiones de energía que se habían observado desde tiempos inmemoriales? Se cree que el astrónomo y matemático griego Hiparco de Nicea (ca. 190 a.C.-ca. 120 a.C.)

se interesó por las estrellas tras observar una de esas supernovas y los astrónomos chinos vieron la SN185, la primera de la que se tiene constancia documental, el año 185 d.C.

Los procesos urca son conceptualmente sencillos y podrían jugar un papel relevante en los estadios finales de una enana blanca que, a su vez, es el remanente estelar de muchas estrellas. Los procesos urca corresponden a las dos reacciones siguientes:

$$ {}^{A}_{Z}Y_{N} + e^{-} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}X_{N+1} + \nu, $$
$$ {}^{A}_{Z-1}X_{N+1} \rightarrow {}^{A}_{Z}Y_{N} + e^{-} + \bar{\nu}. $$

En primer lugar, algún núcleo presente en el interior de la estrella captura un electrón. El núcleo hijo es entonces desplazado por el flujo de materia hacia la superficie de la estrella, donde sufre una desintegración β^{-}, volviendo a generarse el núcleo original. El flujo de materia vuelve a mover el núcleo resultante hacia el interior de la estrella y el ciclo puede volver a comenzar. En cada iteración, el balance neto es que se producen un neutrino y un antineutrino, que difícilmente interactúan con la materia y son emitidos fuera de la estrella llevando una energía no despreciable. El núcleo de la estrella se enfría entonces rápidamente, desapareciendo la presión que contrarresta la fuerza gravitatoria, lo que tiende a colapsar las capas exteriores de la estrella sobre su interior, produciéndose la explosión que da lugar a la supernova. El papel relevante de los neutrinos en este tipo de fenómeno estelar pudo confirmarse en 1987, cuando la observación de la SN1987A coincidió con la detección, unas dos horas antes, de 11 antineutrinos en el detector Kamiokande-II en Japón, 8 en el detector IMB en Estados Unidos y 5 en el detector Baksan en Rusia. El pequeño número de antineutrinos detectados estaba significativamente por encima del fondo de detección de los observatorios, por lo que fueron suficientes para garantizar que se trataba de una emisión real.

El trabajo de Gamow y Schoenberg fue publicado en *The Physical Review* en 1941 con el título «Teoría de los neutrinos del

HISTORIA DE UNA ESTRELLA

Las estrellas se forman a partir del colapso gravitacional de una nube molecular gigante, un objeto estelar de un tamaño de unos 100 años luz y una masa de unos 6 millones de $M_\odot$ (siendo $M_\odot$ la masa del Sol), formado fundamentalmente de hidrógeno. Durante el colapso, la nube se condensa en protoestrellas, objetos cuya temperatura depende de su masa. Si esta es menor que 0,08 $M_\odot$, no alcanzan la temperatura necesaria para que se inicien las reacciones nucleares en su núcleo y se convierten en enanas marrones. En caso contrario, se inicia el ciclo p-p y, eventualmente, el C-N-O, en los que la combustión del hidrógeno genera helio. La radiación producida ejerce una presión de radiación que contrarresta la contracción gravitatoria, y la estrella se estabiliza en la secuencia principal de su evolución; en esta permanece mientras disponga de hidrógeno en su núcleo: desde unos pocos millones de años, en el caso de las supergigantes azules, hasta cientos de miles de millones de años, en el caso de las enanas rojas. La secuencia principal del Sol, una estrella pequeña, es de unos 10 000 millones de años, y ahora se encuentra a la mitad de la misma.

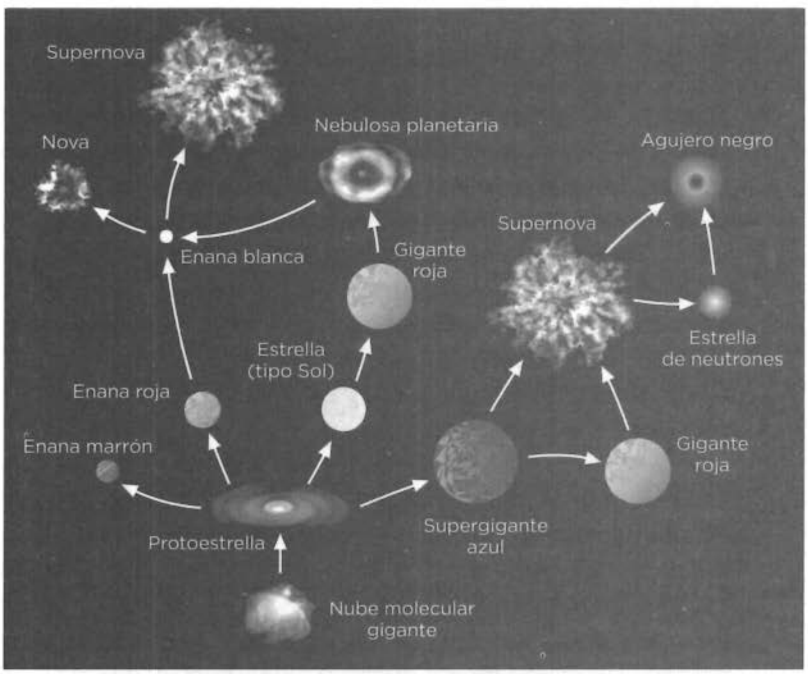
Gigantes y enanas

Consumido el hidrógeno, el núcleo empieza a contraerse de nuevo. Si su masa es superior a 0,5 $M_\odot$, se alcanza la temperatura necesaria para que se fusione el hidrógeno de la capa adyacente al mismo y se inicie la fusión del helio que contiene; la estrella, cuya envoltura se expande debido a la energía producida, se convierte en una gigante roja. Si la masa es menor de 0,5 $M_\odot$, no se activan nuevas reacciones nucleares y la estrella sigue contrayéndose hasta convertirse en una enana blanca de helio. Finalizada la combustión del helio, el núcleo contiene carbono y oxígeno. En las estrellas con una masa de entre 0,5 y 10 $M_\odot$, no se alcanza la temperatura necesaria para que se fusione el carbono y el núcleo vuelve a contraerse hasta que la degeneración electrónica, debida al principio de exclusión de Pauli, actúa: a medida que el núcleo se contrae, los electrones están más próximos entre sí, y como son fermiones y no pueden estar en el mismo sitio, en el mismo instante y en el mismo estado cuántico, aparece una componente de presión opuesta a la contracción. El núcleo se enfría, en las capas adyacentes siguen fusionándose hidrógeno y helio y se producen pulsos térmicos, que expulsan la envoltura de la estrella, formándose una nebulosa planetaria con una enana blanca de carbono y oxígeno en el centro. En las estrellas con masas mayores que 10 $M_\odot$, se produce la fusión del carbono y otros elementos más pesados del núcleo, que acaba conteniendo hierro y elementos vecinos de la tabla periódica. Como su fusión consumiría energía, el núcleo colapsa muy rápidamente, y en algunos casos, debido a mecanismos aún no conocidos con precisión, la energía gravitatoria liberada en el colapso produce la explosión de la estrella: se ha originado una supernova (de tipo Ib, Ic o II, según sean los elementos de la envoltura), quedando una estrella de neutrones, con apenas unas decenas de kilómetros de diámetro y

una densidad superior a los mil millones de toneladas por centímetro cúbico, que se estabiliza debido a la degeneración neutrónica, un efecto similar al de la degeneración electrónica, pero para los neutrones (que también son fermiones). Si la masa del núcleo de elementos pesados es lo suficientemente grande, la degeneración neutrónica es incapaz de contrarrestar el colapso gravitacional de la estrella de neutrones, dando como resultado un agujero negro, cuya densidad es tal que ninguna materia ni radiación puede escapar de él.

Sistemas binarios

Muchas estrellas forman parte de sistemas binarios, en los que uno de los dos componentes es un objeto con un campo gravitatorio muy intenso, como una enana blanca o una estrella de neutrones. Si están lo suficientemente cerca, la primera estrella arranca materia de la segunda, ocasionando fenómenos muy energéticos. En el caso de la enana blanca, puede producirse una nova, en la que la estrella brilla durante un cierto tiempo por encima de su nivel normal, o una supernova de tipo Ia. En el caso de la estrella de neutrones, se puede producir una fusión muy rápida de todo el hidrógeno «capturado», dando lugar a un estallido de rayos X.



colapso estelar». En el texto se indica que las dos reacciones nucleares anteriores «serán denominadas, por brevedad, "procesos urca"». Gamow cuenta en su autobiografía que si los editores de la revista le hubieran preguntado por el significado de «urca», les habría dicho que era un acrónimo de *unrecordable cooling agent* («agente enfriador indetectable», ¡un notable eufemismo para referirse al neutrino!); pero la realidad era otra ya que «Urca» era el nombre del casino de Río de Janeiro donde Gamow y Schoenberg se conocieron. Gamow opinaba que la rapidez con la que el dinero desaparecía de los bolsillos de los jugadores de ruleta en el casino era similar a la velocidad con la que los neutrinos extraían energía del interior de la estrella. En definitiva, otra broma de Gamow, que esta vez fue convenientemente secundada por el astrofísico brasileño.

EL ARTÍCULO $\alpha\beta\gamma$

Durante los primeros años de la década de 1940, después de trabajar con Schoenberg, Gamow continuó estudiando la evolución estelar. Es reseñable un artículo que publicó en 1945 en *The Physical Review* con el título «La evolución de estrellas en contracción». En ese trabajo calculó los cambios en la luminosidad de las estrellas durante su contracción, avanzó que las gigantes rojas eran estrellas muy evolucionadas en las que la fusión se produce en capas que rodean el núcleo de la estrella en el que el hidrógeno ha desaparecido por completo y estableció paralelismos entre distintos objetos estelares.

Pero hacia la mitad de la década, cambió de nuevo sus objetivos científicos, dedicándose a la cosmología física, la parte de la física que estudia el origen y evolución del universo, sus estructuras, su destino final y las leyes que rigen su dinámica. Sin embargo, en esta ocasión el cambio no fue a un «territorio totalmente desconocido». De hecho, retomó las líneas de investigación que le habían interesado en su juventud, cuando estaba en la Universidad de Leningrado. Como él mismo confesó, lo que más le llamaba

ALEXANDER ALEXANDROVICH FRIEDMANN (1888-1925)



Friedmann (o Fridman) nació en junio de 1888 en San Petersburgo. En 1897 ingresó en la escuela secundaria, donde destacó desde el principio junto al que sería gran matemático Yakov Tamarkin. Ambos escribieron en 1905 un artículo sobre los números de Bernoulli publicado en la revista *Mathematische Annalen*, de la que era editor David Hilbert. Se graduó en la Universidad de San Petersburgo en 1910 y obtuvo una plaza de profesor en el Instituto de Minas de la misma ciudad, a la par que realizaba sus estudios para la obtención del máster, aunque su tesis no pudo presentarla hasta 1922. En 1920 obtuvo un puesto en el Observatorio Geofísico de San Petersburgo. Murió en septiembre de 1925 víctima de fiebres tifoideas. Gamow y el también físico Vladimir Aleksandrovich Fock fueron estudiantes suyos. Interesado en algunos problemas de hidrodinámica y meteorología, realizó aportaciones fundamentales en cosmología.

Polémica con Einstein

Estudiando la teoría general de la relatividad encontró nuevas soluciones a las ecuaciones de Einstein, que abrían posibilidades no contempladas anteriormente en la dinámica del universo. En 1922 publicó en *Zeitschrift für Physik* un artículo titulado «Sobre la curvatura del espacio», en el que demostraba que el radio de curvatura del universo podía ser una función creciente o decreciente con el tiempo, o bien periódica. Einstein contestó diciendo que las soluciones de Friedmann correspondientes a un mundo no estacionario le parecían sospechosas y no cumplían las ecuaciones de campo. Friedmann envió entonces una carta a Einstein en la que le aclaraba todos los extremos de sus cálculos y le pedía que en caso de no encontrar ningún error tuviera a bien hacer una rectificación ante la revista alemana. Einstein no contestó a la carta, pero en mayo de 1923 Krutkov, un colega de Friedmann en la Universidad de Petrogrado, coincidió con Einstein y le insistió acerca de los detalles de los cálculos de Friedmann. Einstein admitió su error y escribió en *Zeitschrift für Physik* una nota indicando que los resultados de Friedmann eran correctos. De esta forma, Friedmann abrió la posibilidad de un universo en expansión junto a un universo eternamente inmutable que hasta entonces había sido admitido. Lamentablemente, su prematura muerte no le permitió conocer cuál de las dos opciones sería la verdadera.

la atención en aquel tiempo era la teoría de la relatividad de Einstein, la general más que la especial, pero le faltaba una adecuada fundamentación matemática. Coincidió entonces que Friedmann, un matemático ruso con gran interés en las aplicaciones físicas, impartió un curso sobre «Fundamentos matemáticos de la teoría de la relatividad» y Gamow lo siguió con gran interés. El matemático ruso es conocido por haber encontrado un error en uno de los artículos de Einstein en el que demostraba que el universo debía de ser estable e inmutable en el tiempo y que ese error permitía que, como solución de las correspondientes ecuaciones, también eran posibles otros universos variables con el tiempo, que podían tanto expandirse como colapsar u oscilar. Gamow estaba dispuesto a trabajar con Friedmann en problemas de cosmología, pero la prematura muerte del matemático truncó sus planes.

En 1937 Gamow impartió un curso en la Universidad de Washington sobre la teoría de la relatividad y su conexión con la cosmología. Y en abril de 1942, la octava conferencia de Washington tuvo por título «Evolución estelar y cosmología» y en el documento de conclusiones que redactaron el geofísico estadounidense Flemming y el propio Gamow, puede leerse: «Parece por tanto más plausible que los elementos se originaron en un proceso de carácter explosivo que tuvo lugar al "principio del tiempo" y dio lugar a la actual expansión del universo».

En 1938, Von Weizsäcker, en el trabajo que se ha citado antes en relación a los ciclos de producción de energía estelar, había especulado sobre la misma idea. Aunque en ambos se concluía que no era posible que en las estrellas se produjesen cantidades apreciables de elementos más pesados que el helio, desde un punto de vista cosmológico los artículos de Von Weizsäcker y Bethe sobre el ciclo C-N-O son muy diferentes. Bethe se centró en el cálculo detallado de la producción de energía en las estrellas y en su opinión solo podía suponerse que los elementos pesados deberían haberse formado con anterioridad a que las estrellas alcanzasen el estado de presión y temperatura que le servía de base para sus cálculos. Von Weizsäcker, sin embargo, no tuvo las mismas reservas que Bethe y en su trabajo, además de proponer los ciclos de producción de energía (basándose en argumentos cualitativos y con

mucho menos detalle en los cálculos que Bethe), conjeturó sobre un estado inicial del universo que respondería a una agregación primigenia de materia, formada quizá por hidrógeno, que colapsaría por la influencia de la gravedad hasta alcanzar las condiciones extremas (una temperatura de 10^{11} K y una densidad próxima a la del núcleo atómico) que permitirían la formación de los distintos elementos. El trabajo de Von Weizsäcker debe considerarse como uno de los primeros intentos de dar una explicación física del origen del universo. Sin embargo, en 1942 la conclusión de la conferencia de Washington estaba mejor justificada: la existencia de los elementos pesados requería el evento marcado por la explosión inicial.

Ese era el interés último de Gamow en el problema del origen del universo: entender cómo, dónde y en qué circunstancias se produjeron los elementos químicos con el fin de aclarar su abundancia relativa. Ese interés ya lo había puesto de manifiesto en 1935 con motivo de una conferencia que impartió en la Universidad de Ohio. De alguna manera, convencidos como estaban de que las estrellas no proporcionaban el escenario adecuado para producir elementos pesados, los astrofísicos nucleares trasladaron de forma natural su atención a otra de las pocas (quizá la única razonable) opciones que tenían: un universo con condiciones extremas en su origen. Sin embargo, hasta ese momento no tenían en mente hacer confluir la física nuclear y la cosmología, que se mantenían como disciplinas completamente separadas. De hecho, no fue hasta 1945 cuando Gamow empezó a ver el problema desde un punto de vista más interdisciplinar. El primer atisbo de ello está en la carta de felicitación que envió a Bohr con motivo de su 60º aniversario:

> Sería muy agradable si el final de la guerra significara la vuelta a la vida pacífica, tal y como era hace 15 años cuando bebíamos chocolate caliente en uno de tus pasados cumpleaños en Blegdamsvejen. Pero de alguna manera no me siento así en este momento, y me parece a mí más como la víspera de un gran aluvión proveniente del Este que está obligado a sepultar al hombre libre en la Tierra. ¡Lo siento! No había empezado esta carta para manifestar pesimismo y ese es justo mi estado de ánimo [...] ¡Pero sería realmente muy agra-

> dable si uno pudiera comenzar a trabajar de nuevo en ciencia pura sin las pesadas nubes que cuelgan del aire! Es lo que estoy tratando de hacer ahora estudiando el problema del origen de los elementos en las etapas iniciales del universo en expansión. Eso significa unir las fórmulas relativistas para la expansión y las tasas de reacciones termonucleares y de fisión. Un punto interesante es que el período de tiempo durante el que tuvo lugar la fisión original [...] debe haber sido menor de un milisegundo, mientras que solo una décima de segundo estuvo disponible para establecer el subsiguiente equilibrio termodinámico (si lo hubo) entre los diferentes núcleos ligeros.

Pero Gamow tardó aún un año más en producir un resultado desde este nuevo punto de vista. En 1946 publicó en *The Physical Review* un breve artículo de apenas dos páginas titulado «Universo en expansión y el origen de los elementos», que algunos historiadores de la ciencia consideran como el trabajo que dio lugar al cambio hacia la moderna cosmología. En este trabajo propugnaba que el universo pudo estar constituido inicialmente por un gas denso de neutrones que formaría complejos neutros más o menos grandes, y estos generarían las distintas especies atómicas mediante sucesivas desintegraciones β. Aunque no lo mencionó en su trabajo, en la hipótesis de Gamow estaba implícita la relevancia de los procesos de captura neutrónica en la producción de elementos en esos estadios iniciales de la evolución del universo.

Ese mismo año, Gamow empezó a supervisar la tesis doctoral de Ralph Alpher (1921-2007), hijo de emigrados rusos judíos nacido en Washington. En 1941, Alpher había obtenido una plaza en el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins, en Maryland. Tras un intento fallido en el que, al cabo de un año, se encontró con la desagradable sorpresa de que el tema de tesis que le habían propuesto ya estaba publicado, contactó con Gamow y este le propuso analizar en detalle la distribución de elementos en el universo a la luz de su modelo. Para llevar a cabo el trabajo propuesto era necesario tener información experimental sobre las secciones eficaces de los procesos de captura de neutrones por el mayor número de especies nucleares posibles.

La fortuna hizo que en la reunión anual de la *American Physical Society* de aquel año, el físico nuclear estadounidense Donald J. Hughes presentara una buena colección de esos datos. Esa información era también muy relevante para otras cuestiones, como la elección de los materiales más adecuados para la construcción de reactores nucleares. Alpher estaba presente en la reunión y en cuanto volvió a Maryland cotejó los datos de Hughes con los que el geoquímico suizo Victor Moritz Goldschmidt había publicado en 1938 sobre las abundancias relativas de los elementos en el universo y encontró una clara correlación entre los logaritmos de ambos conjuntos de datos (figura 3), lo que apoyaba la hipótesis de Gamow. Alpher completó su tesis doctoral el verano de 1948 y la lectura de su trabajo generó un inusual interés mediático provocado sin duda por el tema, relacionado por algunos con la creación del mundo.

Justo antes de completar la presentación de la tesis doctoral, Alpher y Gamow escribieron el famoso artículo αβγ del que hablábamos al principio de este capítulo. Aparte del componente jocoso ya comentado, el contenido del trabajo es relevante, ya que sugiere una nueva imagen del universo más temprano. En un artículo titulado «Una teoría basada en captura neutrónica de la formación y abundancia relativa de los elementos», publicado en

FIG. 3

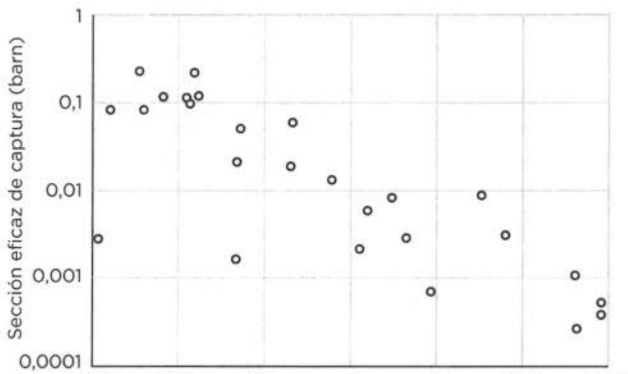


Gráfico de un trabajo de Alpher en el que se comparan las secciones eficaces de captura neutrónica de distintos isótopos con la abundancia relativa de los mismos.

1948 en *The Physical Review*, Alpher explicaba los detalles del modelo que habían desarrollado:

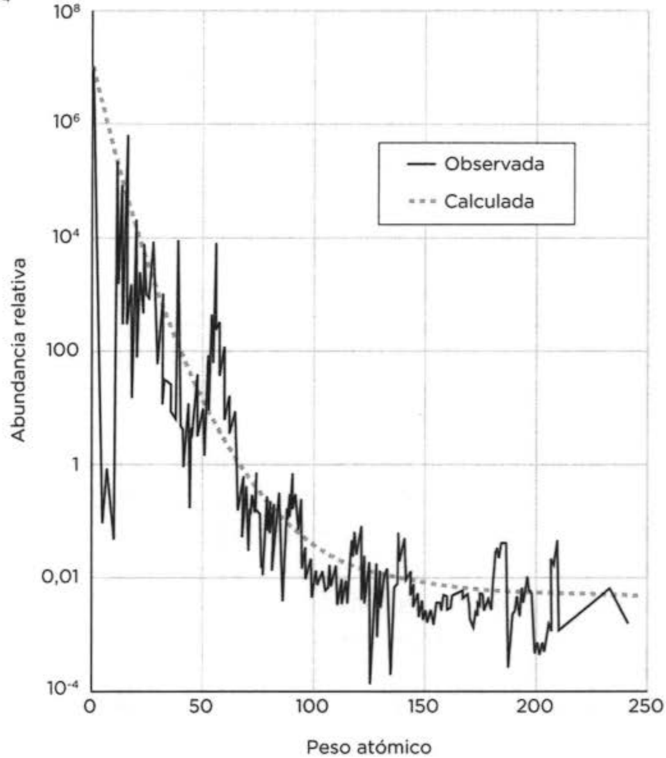
> Enseguida tras el principio de la expansión del universo, el *ylem* era un gas de neutrones solo. Esos neutrones empezaron a desintegrarse en protones y electrones, siendo la densidad suficientemente baja para permitir la desintegración libre de los neutrones y la temperatura suficientemente alta para que la energía térmica media por neutrón fuera mayor que la energía media de enlace por nucleón en el núcleo, de manera que los núcleos como tal no podían formarse. Cuando la temperatura descendió suficientemente en la expansión, comenzó la captura de neutrones por protones, dando lugar a deuterones. Esos núcleos capturaron a continuación más neutrones y se fueron creando sucesivamente núcleos más pesados. Los núcleos creados de esta forma tenían un gran exceso de neutrones y, por tanto, habrían sufrido las consiguientes desintegraciones β, transformándose en formas estables durante y después del proceso de formación de elementos. El proceso debió de terminar por la disminución en las tasas de las reacciones de captura originadas por la reducción de la densidad en la expansión y del número de neutrones disponibles como resultado de su desintegración radiactiva.

El resultado que obtuvieron es el que aparece en la figura 4, que muestra el logaritmo de la abundancia relativa de los distintos isótopos frente a su peso atómico. Como puede verse, el cálculo (que aparece con línea a trazos) presenta el mismo comportamiento que los datos de Goldschmidt, destacando (porque en su momento resultó problemática su explicación) la constancia de la abundancia relativa de los elementos más pesados.

Ese *ylem* del que hablaba Alpher en su artículo es como Gamow y sus estudiantes llamaban a la «amalgama primigenia». En ese mismo trabajo, Alpher aclaraba el significado de la palabra:

> De acuerdo con el *Nuevo Diccionario Internacional Webster's* (2ª ed.), la palabra «ylem» es un nombre obsoleto que significa: «La sustancia primordial de la que los elementos fueron forma-

FIG. 4



Representación de la ilustración del famoso artículo $\alpha\beta\gamma$ en la que se comparan los datos experimentales disponibles de las abundancias relativas frente al número atómico con los resultados del cálculo (línea a trazos) realizado por Alpher y Gamow.

dos». Parece muy deseable que una palabra con un significado tan apropiado sea resucitada.

Casi desde el principio, Alpher colaboró con otro colega de su laboratorio, Robert Herman (1914-1997), hijo también de emigrados rusos judíos, que había nacido en Nueva York y había hecho la carrera de Física en la Universidad de Princeton, donde se había doctorado en 1940. A diferencia de Alpher, Herman era un buen conocedor de la teoría de la relatividad y de la cosmología que había estudiado en Princeton. Animados por Gamow, trabajaron en el refinamiento de los cálculos que Alpher había hecho en su tesis doctoral y, entre otros, publicaron un artículo titulado

«Sobre la abundancia relativa de los elementos», que apareció en *The Physical Review* a finales de 1948 y en el que obtenían un buen acuerdo con un nuevo conjunto de datos experimentales que había obtenido el físico estadounidense H.S. Brown, y que aún no se había publicado.

En 1948, Gamow, Alpher y Herman ya se habían percatado de que el modelo que estaban considerando, basado en el condensado inicial de neutrones, no era adecuado: ese *ylem* que contenía solo neutrones no bastaba para dar cuenta de la situación real. Siendo su temperatura del orden de 10^9 K, la ley de Stefan-Boltzmann, que establece que la densidad de radiación es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura, imponía, primero, que además de materia debía existir radiación en ese estadio primigenio, y, segundo, que la densidad de esa radiación debía ser mucho mayor que la propia densidad de materia. Ya en un trabajo escrito para *Nature*, titulado «La evolución del universo», publicado durante el verano de 1948, Gamow tuvo en cuenta la presencia de esa radiación y arguyó que la formación de las *protogalaxias* (los objetos estelares precursores de las galaxias) tuvo lugar en un momento de la expansión del universo en el que las densidades de radiación y de masa eran casi iguales y la temperatura había descendido a aproximadamente 10^3 K. Antes de enviarlo a la revista, les pasó el manuscrito a Alpher y Herman, que descubrieron algunos errores en los cálculos de Gamow. Este prefirió no corregirlos e instó a sus colaboradores a que escribieran por su parte una nota para *Nature* donde mostraran los cálculos correctos. En un trabajo homónimo del de Gamow, «Evolución del universo», que apareció publicado en el mismo número de la revista unas cuantas páginas después, y en otro que se publicó en *The Physical Review* en abril de 1949 con el título «Observaciones sobre la evolución del universo en expansión», Alpher y Herman hicieron notar esos errores. Pero, además, en estos dos trabajos incluyeron explícitamente un resultado de gran relevancia: encontraron que la temperatura del universo actual debería ser de unos 5 K y aclararon que:

> Esta temperatura media debe interpretarse como la temperatura de fondo que resultaría solo de la expansión del universo. Sin embargo,

la energía térmica resultante de la producción de energía nuclear en las estrellas incrementaría este valor.

Las ecuaciones que utilizaron para encontrar este resultado estaban también en el trabajo de Gamow que, sin embargo, no hizo la estimación concreta de esa temperatura actual del universo. En el fondo ninguno de los tres daba especial importancia a dicho valor.

En los años siguientes tampoco ese resultado llamó la atención de los cosmólogos y astrofísicos. Sin embargo, con el paso del tiempo, en 1964, los físicos estadounidenses Penzias (n. 1933), alemán de nacimiento, y Wilson (n. 1936), mientras construían una antena de alta sensibilidad para radioastronomía en el observatorio de los Laboratorios Bell, observaron un ruido de fondo que no pudieron adscribir a ninguna fuente de interferencias conocida. Penzias contactó con el astrofísico Dicke (1916-1997), que les sugirió que tal vez pudiera tratarse de la radiación cósmica de microondas de fondo cuya existencia predecían algunas teorías cosmológicas. La radiación presentaba un espectro térmico de unos cuantos grados kelvin (hoy día se ha podido medir con precisión: 2,72548 K). Penzias y Wilson obtuvieron el premio Nobel de Física en 1978 por su descubrimiento (que compartieron ese año con Kapitsa, antiguo amigo de Gamow, que lo recibió por sus invenciones y descubrimientos básicos en el área de la física de bajas temperaturas). Sin embargo, no mencionaron en sus trabajos las predicciones del grupo de Gamow de más de diez años antes. De hecho, en 1950, Alpher y Herman refinaron su evaluación, obteniendo 2,8 K, y en 1953 Gamow obtuvo el valor de 7 K con un cálculo novedoso, muy simple, que publicó en una revista danesa y que no ha estado desde su publicación falto de controversia, si bien nadie ha podido descubrir fallo alguno en el mismo. Aunque Penzias se disculpó por su olvido, Gamow no pudo ocultar su malestar por ello.

Las teorías cosmológicas a las que se refería Dicke no eran otras que las que asumían un origen en el tiempo y en el espacio para un universo en expansión y, entre ellas, el modelo del Big Bang.

BIG BANG

A pesar de que en muchos ámbitos se atribuye la invención del nombre *Big Bang* a Gamow, en realidad a él no le gustó nunca. Como confesó a Weiner en la entrevista que le concedió poco antes de su fallecimiento y a la que ya nos referimos en la introducción:

> Nunca lo llamé *big bang* ya que es una especie de cliché. Fue inventado, creo, por los cosmólogos [defensores] de la teoría del estado inmutable: «big bang», y también lo llamaban «bola de fuego», que no tiene nada que ver con ello, no es una bola de fuego en absoluto. Nada que ver con la bola de fuego de la bomba atómica.

Gamow no utilizó en sus trabajos el término salvo en un trabajo publicado en 1961 en *Scientific American*, titulado «Gravedad». Él prefería otras denominaciones, como la teoría de la evolución relativista o de la hipótesis del «principio». En su libro de divulgación que lleva por título *La creación del universo* describió con detalle su modelo cosmológico sin mencionar en ningún momento *Big Bang* y utilizando otra denominación: la *gran compresión* del universo que debió anteceder al inicio de su expansión.

Efectivamente, el término *Big Bang* lo utilizó por primera vez en el contexto cosmológico el astrónomo inglés Fred Hoyle (1915-2001). En 1949 intervino en un programa de radio de la BBC en el que describió la teoría del estado estacionario. Este modelo del universo había sido propuesto a finales de los años veinte por el físico y astrónomo inglés James Hopwood Jeans y revisado en 1948 por el propio Hoyle e, independientemente, por los austríacos Bondi, cosmólogo y matemático, y Gold, astrofísico. La teoría asumía que el universo, a gran escala, no cambia y no lo hará nunca, es decir, no tuvo un origen, sino que siempre existió de la misma manera. Se satisfacía así el denominado *principio cosmológico*, un axioma que establece que la distribución de materia en el universo es homogénea e isótropa. Una de las principales dificultades de este modelo estribaba en la descripción de la ex-

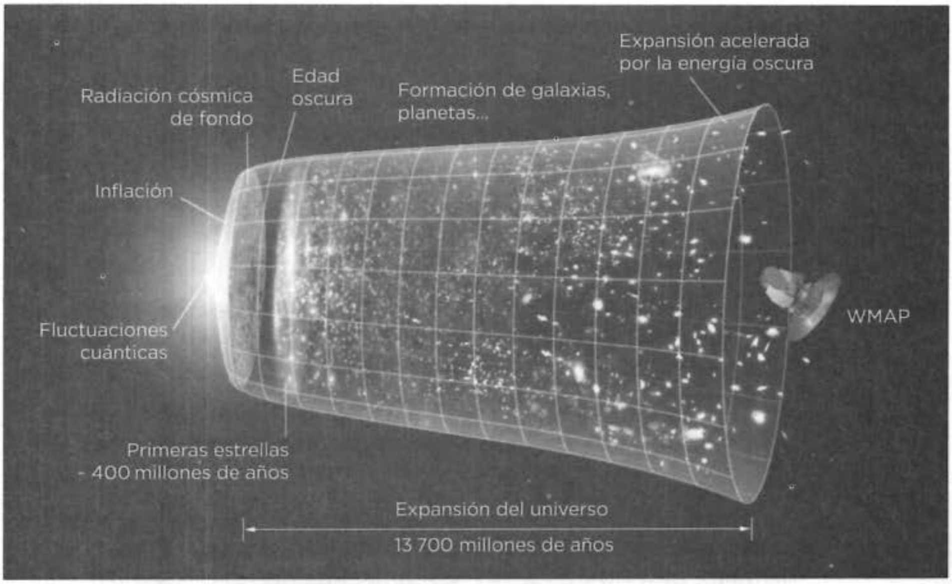




FOTO SUPERIOR:
En la década de 1940 Gamow lanzó la hipótesis de que el universo se originó en un proceso de carácter explosivo que dio lugar a su actual expansión, teoría que sería conocida como Big Bang. La ilustración muestra la evolución del universo desde la «gran explosión».

FOTO INFERIOR:
La confirmación de la validez del modelo del Big Bang llegó con el descubrimiento de la radiación de fondo de microondas por Arno Allan Penzias (derecha) y Robert Woodrow Wilson (izquierda) en 1964, mientras construían una antena de alta sensibilidad.

pansión del universo que se plasmaba en la denominada *ley de Hubble*:

- — Los objetos estelares del espacio profundo presentan un desplazamiento Doppler que se interpreta como una velocidad relativa respecto de la Tierra.

- — Esa velocidad relativa es proporcional a la distancia entre el objeto y la Tierra.

Esta ley la estableció el astrónomo estadounidense Edwin Powell Hubble (1889-1953) en 1929. Un universo en expansión no mantendría una densidad de materia promedio constante y por ello Hoyle, Bondi y Gold añadieron al modelo una «fuente de materia» y propusieron que en el universo se producía creación de materia de forma continua y espontánea, pero con una tasa tan pequeña (del orden de 10^{-43} g/cm$^3 \cdot$s) que no podría ser detectada experimentalmente.

Evidentemente, la teoría del estado estacionario de un universo sin inicio ni final se contraponía a los distintos modelos de universos con un principio. Tratando de describir estos últimos, Hoyle habló de «la hipótesis de que toda la materia del universo fue creada en un *big bang* en un instante particular del pasado remoto». Hoyle consideraba que esta hipótesis era irracional y ajena a la ciencia: «No puedo ver ninguna buena razón para preferir la idea del *big bang*», concluía en su intervención en la BBC. Y aunque posteriormente suavizó su postura frente al modelo, nunca dejó de manifestarse en contraposición con el mismo.

Mucho se ha escrito sobre si Hoyle mencionó el *big bang* con tono despectivo e insultante hacia los defensores de la teoría contraria, pero el propio Hoyle lo negó explícitamente en muchas ocasiones. Es más que plausible que, simplemente, necesitado de imágenes sencillas que le permitieran transmitir a la audiencia radiofónica de la BBC los conceptos técnicos que pretendía explicar, Hoyle inventara el término sobre la marcha.

Sea como fuere, no cabe duda de que se trata de uno de los nombres con más éxito en la historia de la ciencia, un éxito que,

FRED HOYLE (1915-2001)



Hoyle fue un astrónomo inglés, nacido en Yorkshire en 1915. Estudió matemáticas en el Emmanuel College de Cambridge y durante la Segunda Guerra Mundial trabajó para el Almirantazgo británico en investigaciones relacionadas con el radar. En 1945 volvió a la Universidad de Cambridge donde estuvo hasta 1973. En 1967 fue director fundador del prestigioso Instituto de Astronomía de Cambridge, que bajo el liderazgo de Hoyle llegó a ser una de las instituciones más importantes del mundo en astrofísica teórica. Tras abandonar Cambridge, se dedicó a escribir libros de divulgación científica y de ciencia ficción, dando numerosas conferencias en muchas universidades y centros de investigación por todo el mundo. Desde 1973 fue presidente del comité de dirección del telescopio anglo-australiano construido en Nueva Gales del Sur (Australia). En 1997, mientras hacía senderismo cerca de su pueblo natal, cayó en un profundo barranco de donde fue rescatado horas más tarde con múltiples lesiones. A partir de ese momento vivió aquejado de problemas de memoria y agilidad mental. Falleció en 2001.

Trabajos científicos

A finales de los años cuarenta, Hoyle publicó los primeros trabajos sobre la generación de elementos más pesados que el helio en las estrellas, proponiendo que la temperatura que se alcanzaba en el núcleo de las mismas era en realidad mucho mayor que la que se había considerado para las reacciones termonucleares responsables de la producción de energía en la secuencia principal de su evolución. Además, propuso que los elementos entre el carbono y el hierro se producirían por reacciones nucleares de fusión en capas concéntricas, con abundancia de ciertos constituyentes, que formarían determinadas estrellas masivas en un estado evolucionado previo a una supernova. En particular, propuso la existencia de un estado excitado del carbono, entonces desconocido, que era necesario para que el proceso de generación de ^{12}C a partir de tres partículas α pudiera tener lugar con la suficiente asiduidad y permitiera explicar la abundancia de carbono. En 1957 publicó el famoso trabajo «Síntesis de los elementos en las estrellas» junto con Eleanor Margaret Burbidge, Geoffrey Ronald Burbidge y Fowler (ganador del premio Nobel en 1983), un trabajo fundamental en la explicación de la nucleosíntesis, ampliamente citado.

EL EFECTO DOPPLER

El efecto o desplazamiento Doppler designa el efecto físico que ocurre cuando la frecuencia de una onda es medida por un observador que está en movimiento respecto a la fuente que emite dicha onda. Fue propuesto por el matemático y físico austríaco Christian Andreas Doppler en 1842, y lo utilizó para estudiar el color de la luz emitida por las estrellas binarias. En 1845 fue comprobado por el químico y meteorólogo holandés Buys Ballot para el caso de ondas de sonido, y en 1948, el físico francés Fizeau lo descubrió independientemente para las ondas electromagnéticas.

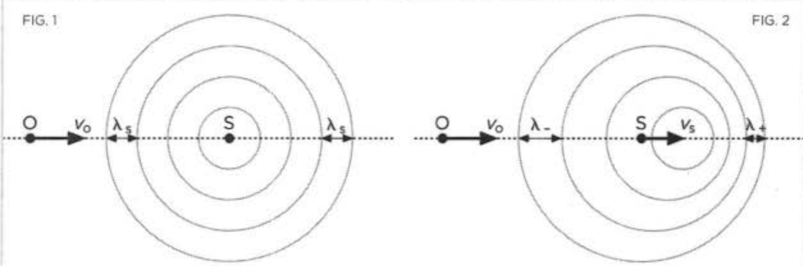
El sonido

Veamos en primer lugar lo que ocurre en el caso del sonido. Una fuente *S* emite una onda sonora que se desplaza en el aire con una velocidad constante *v*. Si la fuente está en reposo (figura 1), la longitud de onda de dicha onda, es decir, la distancia entre máximos consecutivos de la misma (representados en la figura por las circunferencias), será $\lambda_s = v/f_s$, donde f_s es la frecuencia de la onda. Supongamos ahora que la fuente se mueve con una velocidad constante v_s (figura 2). Entonces la longitud de onda cambia. En efecto, el tiempo que tarda la fuente en emitir un ciclo completo de la onda es el período de la misma, $T = 1/f_s$; durante ese tiempo la onda habrá viajado una distancia $vT = v/f_s$ mientras que la fuente se habrá desplazado $v_s T = v_s/f_s$. Entonces, la longitud de onda en la dirección del movimiento de la fuente será $\lambda_+ = (v - v_s)/f_s$, en el sentido hacia delante, y $\lambda_- = (v + v_s)/f_s$, hacia atrás. Hacia delante las ondas se comprimen y hacia atrás se estiran.

En movimiento

Consideremos ahora un observador O que se mueve con una velocidad v_o hacia la fuente que está en reposo. La velocidad de la onda relativa al observador es $v + v_o$ y la frecuencia que escucha el receptor es $f_o = (v + v_o)/\lambda_s = f_s(1 + v_o/v)$, y la frecuencia medida por el observador es mayor que la original. Si en lugar de acercarse a la fuente, el observador se aleja de ella, la

FIG. 1 FIG. 2



frecuencia que mide viene dada por $f_o = f_s(1 - v_o/v)$, que es inferior a la original. Supongamos ahora que tanto el observador como la fuente se mueven tal y como se indica en la figura 2. Como antes, la velocidad relativa de la onda sonora respecto del observador es $v + v_o$, pero ahora la longitud de onda es λ_-, por lo que la frecuencia que detectará el observador es $f_o = (v + v_o)/\lambda_- = f_s[(v + v_o)/(v + v_s)]$. Esta ecuación es totalmente general e incluye todas las posibilidades de movimiento relativo entre fuente y observador, no solo la que se muestra específicamente en la figura. Por ejemplo, podemos considerar el caso experimentado por cualquiera al oír la sirena de una ambulancia que se acerca a nosotros. Cuando la ambulancia se acerca y el observador está en reposo, la frecuencia que detectamos $f_o = f_s[v/(v - v_s)]$ es superior a la original, y cuando se aleja $f_o = f_s[v/(v + v_s)]$ corresponde a un tono más bajo que el propio de la sirena. Nuestra experiencia nos indica, sin embargo, que a medida que la ambulancia se aproxima el tono que escuchamos se va haciendo cada vez más agudo (la frecuencia crece), y el sonido es cada vez más grave (la frecuencia disminuye) una vez que se aleja. La razón de esa frecuencia variable es que la velocidad v_s que aparece en las expresiones anteriores es, en realidad, la componente de la velocidad de la ambulancia medida sobre la dirección que une nuestra posición y la de la ambulancia. Afortunadamente, nuestra posición no está en la trayectoria de la ambulancia, de manera que ese componente varía a medida que la ambulancia se mueve: disminuye cuando va aproximándose a nosotros (lo que hace crecer la frecuencia del sonido que oímos), se anula cuando la ambulancia se encuentra a nuestra altura (momento en el que escuchamos la frecuencia real de la sirena), para ir aumentando de nuevo a medida que se aleja (con lo que la frecuencia vuelve a disminuir).

Las ondas electromagnéticas

En el caso de las ondas electromagnéticas (por ejemplo, la luz emitida por las estrellas), es necesario utilizar las expresiones relativistas para la composición de las velocidades que intervienen en el problema, y eso lleva a que la expresión que resulta para la frecuencia observada sea $f_o = f_s[(c - v)/(c + v)]^{1/2}$, donde c es la velocidad de la luz y v la velocidad relativa entre la fuente y el receptor, de manera que si ambos se alejan, $v > 0$, y al contrario si se acercan. En el primer caso la frecuencia disminuye; en el segundo aumenta. En el caso de las estrellas, se pudo observar que las líneas espectrales correspondientes a los elementos químicos presentes en ellas aparecían para frecuencias más pequeñas que las que habían sido observadas en los experimentos realizados en la Tierra para los mismos elementos, ya conocidos desde la última mitad del siglo XIX. Frecuencias más pequeñas significaban longitudes de onda más grandes y, en el caso de las líneas espectrales que aparecían en la parte visible del espectro electromagnético, estas resultaban desplazadas hacia el rojo (el color visible con menor frecuencia). Este efecto permitió establecer la expansión del universo.

no obstante, tardó en llegar, ya que no fue hasta los años setenta cuando empezó a utilizarse de manera continuada en el ámbito de la cosmología. De hecho, el término tuvo inicialmente más impacto en publicaciones populares estadounidenses que en trabajos científicos. La primera vez que se utilizó en un artículo de investigación fue en el titulado «Formación de los elementos», del físico nuclear y astrofísico estadounidense Fowler, publicado en *Scientific Monthly* en 1957.

GAMOW Y LA TEORÍA DEL ESTADO ESTACIONARIO

El undécimo Congreso Solvay tuvo lugar en 1958 y estuvo dedicado a la «Estructura y evolución del universo». Según cuenta Gamow en su autobiografía, poco antes de la celebración de la reunión recibió una carta de Pauli en la que le preguntaba si quería ser invitado a participar en ella. Gamow le contestó que sí, diciéndole que, además, por aquellas fechas estaría en Europa. Sin embargo, al poco tiempo recibió otra misiva de Pauli en la que le decía que había pedido a Bragg (el presidente del comité organizador) que cursara la invitación, pero que este le había dicho que lamentablemente ya no había vacantes. Gamow creyó que todo era debido a su posición de *oponente* a la teoría del estado estacionario, que habían propuesto Hoyle, Bondi y Gold, compatriotas de Bragg. Gamow plasmó su desilusión en el texto siguiente extraído de su autobiografía:

> En el principio Dios creó la radiación y el *ylem*. Y el *ylem* estaba sin forma ni número, y los nucleones corrían alocadamente sobre la cara de la oscuridad. Y Dios dijo: «Hágase la masa dos». Y la masa dos se hizo. Y Dios vio el deuterio y era bueno. Y Dios dijo: «Hágase la masa tres». Y la masa tres se hizo. Y Dios vio el tritio y el tralfio [helio-3] y eran buenos. Y Dios continuó diciendo número tras número hasta que llegó a los elementos transuránicos. Pero cuando miró atrás hacia Su trabajo, encontró que no era bueno. En la excitación por contar Él se olvidó de decir la masa cinco y, por tanto, naturalmente, ningún elemento más pesado podría haber sido formado. Dios estaba muy decepcionado y quiso primero contraer el universo de nuevo y empezar todo desde el principio. Pero eso habría sido demasiado sencillo. Así, siendo todopoderoso, Dios decidió corregir Su error en la forma más imposible. Y Dios dijo: «Hágase Hoyle». Y Hoyle se hizo. Y Dios miró a Hoyle [...] y le dijo que hiciera los elementos más pesados de la forma que quisiese. Y Hoyle decidió hacer los elementos pesados en las estrellas, y difundirlos por todos lados mediante explo-

LOS PADRES DEL MODELO

El espaldarazo a la hipótesis del Big Bang llegó, como se ha indicado antes, con el descubrimiento de la radiación de fondo de microondas por Penzias y Wilson en 1964. Sin embargo, la historia del modelo que con el paso del tiempo se conoció como teoría del Big Bang había nacido mucho tiempo antes. Hasta 1930 el universo estático asumido en la teoría general de la relatividad fue



Asistentes al Congreso Solvay de 1958. Entre otros, Lemaître, Pauli, Bragg y Oppenheimer (tercero, quinto, sexto y séptimo por la izquierda, sentados) y Hoyle (tercero por la izquierda de pie).

siones supernovas. Pero haciendo eso tuvo que obtener la misma curva de abundancia que se habría obtenido de la nucleosíntesis en el *ylem* si Dios no se hubiera olvidado de decir la masa cinco. Y así, con la ayuda de Dios, Hoyle hizo los elementos pesados de esta manera, pero era tan complicado que hoy ni Hoyle, ni Dios, ni ningún otro puede comprender cómo fue hecho.

el escenario en el que astrónomos y astrofísicos desarrollaban sus investigaciones. En 1928, Eddington conjeturó, en un libro titulado *La naturaleza del mundo físico*, sobre la posibilidad de un estado de mínima entropía que podría corresponder al «inicio cósmico», pero él mismo declaraba en el libro que «como científico no creo que el universo comenzó con un *bang*», con una «curiosa» utilización de la palabra final, dado el contexto. Sin embargo, el primero en hablar de un estado inicial del universo y de su expansión fue el astrónomo belga Lemaître (1894-1966), que redescubrió independientemente las soluciones de las ecuaciones de Einstein que Friedmann había encontrado años antes. Pero a diferencia de este, fue capaz de relacionar las soluciones que predecían un universo en expansión con los datos experimentales de los desplazamientos Doppler hacia el rojo entonces existentes. Este resultado data de 1927, dos años antes de que Hubble enunciara su ley y, de hecho, hoy día hay una gran controversia sobre la autoría real del descubrimiento, ya que no está claro si Hubble conocía o no el trabajo de Lemaître cuando formuló la ley que lleva su nombre.

En 1927, el universo de Lemaître no incluía el concepto de Big Bang. Se expandía desde un estado preexistente al que no se podía asignar una edad determinada. Sin embargo, en 1931, en un trabajo publicado en *Nature* titulado «El principio del mundo desde el punto de vista de la teoría cuántica», Lemaître sugiere por vez primera que el estado inicial del universo podría haber sido un sistema con la densidad del núcleo atómico y el tamaño del sistema solar que se habría desintegrado o habría explosionado en un proceso «súper radiactivo». Aunque pensaba que ese estado había existido realmente, creía que no era posible obtener información sobre sus propiedades físicas: el tiempo habría empezado después de la explosión radiactiva, instante en que habría comenzado la expansión del universo. Lemaître no discutió el origen de ese «sistema primigenio», pero algunos historiadores piensan que, siendo además de astrónomo un sacerdote católico, podría creer que había sido creado por Dios. Lemaître denominó a su teoría como la del *átomo primigenio* y sus colegas cosmólogos la trataron como especulativa, pero no

cabe duda de que puede considerarse como uno de los padres del modelo del Big Bang.

El otro fue, sin duda, Gamow. El camino que siguió hasta la propuesta de su modelo cosmológico fue, como ya hemos visto antes, bien distinto al de Lemaître, poniendo su interés en la formación de los elementos desde un estado inicial de muy alta densidad y temperatura. Es precisamente esta característica de un universo inicial muy caliente la que distingue el modelo de Gamow (y Alpher y Herman). Curiosamente Gamow, en su autobiografía, atribuye la autoría de esa hipótesis a Friedmann.

> «De acuerdo con la teoría original de Friedmann del universo en expansión, este había empezado con un "estado singular" en el que la densidad y la temperatura de la materia eran prácticamente infinitas».
>
> — **George Gamow, atribuyéndole a Friedmann la autoría de la hipótesis del universo en expansión.**

Sin embargo, en ninguno de los pocos trabajos de Friedmann se hace mención de las posibles propiedades físicas del universo en su estado inicial: sus trabajos eran puramente matemáticos y la importancia que él daba a sus resultados estribaba en las características de las soluciones de las ecuaciones que había encontrado. Algunos historiadores opinan que esa idea acerca de las propiedades físicas del universo inicial podría haber sido entendida como natural (y, por tanto, sobreentendida) en las discusiones de Friedmann con sus estudiantes de entonces, pero no hay ningún documento que permita suponer que así era, salvo el comentario de Gamow antes mencionado.

El modelo de Gamow, no obstante, solo pudo explicar la formación de los elementos más ligeros, esencialmente el helio. Se requirieron algunos años, hasta 1957, para entender los procesos de generación de los elementos más pesados. Entonces los astrofísicos E.M. Burbidge y G.R. Burbidge (que eran matrimonio), Fowler y Hoyle publicaron en *Review of Modern Physics* el tra-

bajo «Síntesis de los elementos en las estrellas», conocido dentro de la comunidad astrofísica como el «artículo B^2FH» (por las iniciales de los autores), en el que daban las pautas acerca de cómo a través de lo que ellos denominaron procesos r (rápido) y s (lento) se producían esos elementos más pesados, procesos que habrían tenido lugar no en el Big Bang, sino en las propias estrellas y en las supernovas.

En 1951, Gamow envió una copia de sus recientes artículos de divulgación al papa Pío XII, anunciándole que en unos meses iba a aparecer su libro *La creación del universo*. Al parecer el Papa leyó con entusiasmo tanto el libro como los artículos y en noviembre de ese año respaldó el modelo del Big Bang en un largo discurso dirigido a la Academia Pontificia de las Ciencias, reunida en sesión plenaria, que tituló «Las pruebas de la existencia de Dios a la luz de la ciencia natural moderna». Al principio de su intervención aseveró que «cuanto más avanza la ciencia verdadera, más descubre a Dios, casi como si Él estuviera en pie, vigilante y esperando, detrás de cada puerta que la ciencia abre». Y en la conclusión:

> [La ciencia moderna] ha seguido el curso y la dirección de los desarrollos cósmicos y [...] ha indicado su principio en el tiempo en un período hace alrededor de 5 000 millones de años, confirmando con la concreción de las pruebas físicas la contingencia del universo y la deducción bien fundamentada de que alrededor de ese tiempo el cosmos salió de la mano del Creador. Creación, [...] y por tanto, un Creador y, por consiguiente, ¡Dios! Esta es la declaración, incluso aunque no explícita o completa, que demandamos de la ciencia.

A Lemaître, a pesar de su condición religiosa, este tipo de declaraciones triunfales no le resultaban muy adecuadas y refiriéndose a su propia teoría del átomo primigenio expresó: «Hasta donde yo puedo ver, tal teoría permanece completamente al margen de cualquier cuestión metafísica o religiosa».

Ni Gamow ni sus estudiantes analizaron cómo surgió su *ylem*: ellos habían desarrollado un modelo puramente evolutivo,

no una teoría creacionista. Y ni que decir tiene que los tres se cuidaron muy mucho de mantener su universo ajeno a cualquier connotación religiosa. Pero era de esperar que la idea atrajera la atención de creyentes y no creyentes: ¡un universo con principio! Y antes ¿qué?

CAPÍTULO 4

En busca del código desconocido

Tras su brillante etapa como astrofísico y cosmólogo, Gamow entró en una época de cambios importantes en su vida. Se divorció de su primera mujer y se casó de nuevo; abandonó la Universidad George Washington para ir a la de Colorado, con una corta etapa como profesor visitante en Berkeley; trabajó en el problema de la codificación del ADN, y continuó con su destacada labor en aras de popularizar la ciencia. Siguió trabajando y dando conferencias por todo el mundo hasta su fallecimiento en 1968.

En 1954 Gamow escribió un artículo sobre el código genético, por entonces un tema de mucha actualidad, ya que el año anterior el británico Francis Crick y el estadounidense James D. Watson habían descubierto la estructura de la molécula de ADN. Además del propio Gamow, el artículo lo firmaba un tal C.G.H. Tompkins, y su título era «Síntesis de las proteínas por moléculas de ADN». Enviaron el trabajo a una revista estadounidense de prestigio, *Proceedings of the National Academy of Sciences*. En la entrevista con Charles Weiner, Gamow admitió que el trabajo fue rechazado porque los biólogos que lo revisaron tenían objeciones relevantes. Sin embargo, Crick, en su libro *El código genético: ayer, hoy y mañana*, publicado en 1966, relata que el propio Gamow le contó que el artículo no se lo habían aceptado porque el tal Tompkins no era una persona real. El trabajo fue finalmente publicado en una revista danesa, con Gamow como único autor.

Tompkins era el protagonista de una serie de libros de divulgación escritos por Gamow para explicar física al público general. Será difícil, si no imposible, averiguar cuál fue la verdadera razón por la que el trabajo en cuestión no apareció en los mencionados *Proceedings*, pero el episodio no deja de ser digno del Gamow bromista empedernido, que aprovechaba cualquier oportunidad para inventar chanzas y chascarrillos.

GAMOW Y EINSTEIN

En enero de 1939 tuvo lugar la quinta Conferencia de Física Teórica de Washington, que versó sobre «Física de baja temperatura y superconductividad». Las sesiones se dedicaron al estudio de las propiedades del hidrógeno, deuterio y helio líquidos, a la interpretación de los datos disponibles sobre desmagnetización adiabática de diferentes sales paramagnéticas a temperaturas inferiores a 1 K y a la discusión del fenómeno de la superconductividad. Fermi, Uhlenbeck, Bethe, Breit, Condon, Rabi, Rosenfeld y otros asistieron al evento. Sin embargo, fue Bohr quien atrajo la atención sobre un tema ajeno a la conferencia, pero que con el paso del tiempo se convirtió en un hecho de notable importancia para la humanidad: unos meses antes, Hahn y Strassmann habían descubierto la fisión del uranio, y Meitner y Frisch habían interpretado el proceso. Casi inmediatamente se conoció la gran cantidad de energía que en él se liberaba, y algunos físicos como Szilárd, Teller y Wigner convencieron a Einstein para que escribiera la famosa carta al presidente Roosevelt en la que le ponía sobre aviso de sus posibles aplicaciones armamentistas. Después del verano de 1939, Roosevelt creó un comité que fue el germen del Proyecto Manhattan, desarrollado en Los Álamos desde los primeros meses de 1942. A pesar de ser uno de los mejores especialistas en física nuclear al iniciarse la Segunda Guerra Mundial, Gamow no estuvo entre los muchos científicos que se trasladaron a Los Álamos para diseñar y construir la bomba nuclear. Compartió esa situación con el propio Einstein.

Las razones por las que ni uno ni otro fueron llamados a participar en un proyecto científico de tal envergadura no están claras. Algunos piensan que Einstein tenía «demasiado» prestigio, podía hablar directamente con el presidente y, por tanto, habría podido interferir, una vez construido el artefacto, en su posterior utilización. Además, para los servicios de inteligencia era poco convencional, excéntrico, famoso en el mundo entero, ateo y, posiblemente, incluso comunista. Muchas de esas «características» eran compartidas por Gamow, quien además tenía fama de tener poco control con el alcohol y, por supuesto, era ruso. Y aún más, tal como pone de manifiesto el propio George en su autobiografía,

él había sido oficial del Ejército Rojo cuando, con apenas veinte años, había enseñado en la Escuela de Artillería en Leningrado.

En 1935, George y Lyubov tuvieron a su primer y único hijo, Rustem Igor, quien con el paso del tiempo llegó a ser profesor de microbiología en la Universidad de Colorado, aunque antes de seguir sus estudios universitarios trabajó como bailarín de ballet, repartidor y profesor de kárate. Amante de la vida al aire libre, inventó y patentó el *Gamow bag*, un saco inflable del tamaño de una persona que permite modificar la presión para tratar el mal de altura.

En 1940 Gamow obtuvo la ciudadanía estadounidense. Pero a pesar del arraigo que ello podría suponer, las autoridades se mostraron reticentes a su participación en actividades clasificadas. En cualquier caso, tanto Einstein como Gamow actuaron como consultores de la Armada para problemas relacionados con explosivos convencionales. Gamow, con permiso de su universidad, dedicaba un día de trabajo a tal actividad. Einstein, que tenía ya más de sesenta años, había aceptado el encargo con la condición de no tener que viajar a Washington y que su consultoría la llevaría a cabo en Princeton. Según Gamow, sus superiores le encargaron que cada dos semanas se desplazara para mostrar a Einstein los problemas planteados y discutir con él las posibles soluciones. Pero después de resolver las cuestiones relacionadas con los explosivos, tenían tiempo para discutir sobre física y astronomía, y según relata Gamow, en tales ocasiones «[Einstein] era muy original y su mente era tan aguda como siempre». Quizá en el transcurso de una de esas discusiones fue cuando, siempre según Gamow, Einstein le confesó que la introducción del término cosmológico en sus ecuaciones había sido la mayor «metedura de pata» de su vida.

Einstein había incluido en sus ecuaciones de campo de la teoría general de la relatividad un término adicional, la constante cosmológica, con el fin de posibilitar que esas ecuaciones dieran lugar a un universo estático, que era su hipótesis preferida. Sin ese término adicional, la atracción gravitatoria produciría la contracción de un universo inicialmente en equilibrio. Al poco tiempo de que Einstein propusiera esa modificación de sus ecuaciones, se

descubrió que el universo se encontraba en expansión, una situación que, además, era posible explicar a partir de las soluciones de las ecuaciones originales (es decir, sin el término cosmológico) que había encontrado Friedmann. Sin embargo, medidas realizadas a finales del siglo XX con el telescopio espacial Hubble pusieron de manifiesto que la expansión del universo se ha ido

ENERGÍA Y MATERIA OSCURAS

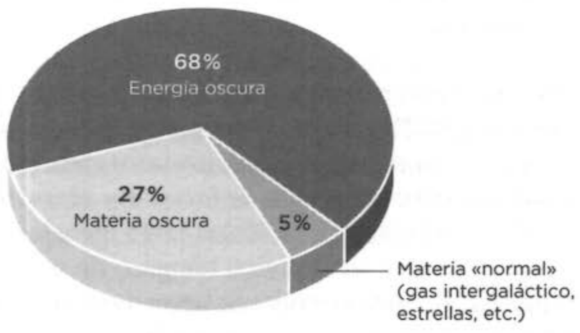
A principios de la década de 1990 se tenía la seguridad de que el universo, debido a la atracción gravitatoria entre los objetos estelares, acabaría ralentizando su expansión, deteniéndola y contrayéndose a continuación. En 1998, el telescopio espacial Hubble produjo una sorpresa: de sus observaciones de supernovas muy alejadas se podía deducir justo lo contrario, es decir, que lejos de lentificarse, la expansión del universo se estaba acelerando. Para tratar de aclarar estos datos experimentales, han surgido dos términos que han tenido un notable impacto: la *energía* y la *materia* oscuras.

Diversas explicaciones

Varias hipótesis se han considerado plausibles para explicar la existencia de la energía oscura. En primer lugar, podría tratarse de una energía intrínseca del «espacio vacío» que podría describirse con una constante cosmológica similar a la usada por Einstein en sus ecuaciones: a medida que el universo se expande aparece más espacio, aumenta la energía y la expansión se acelera más y más. Una segunda posibilidad es que la teoría de la gravitación de Einstein no sea correcta y sea necesaria una nueva teoría que sustituya a las actuales ecuaciones de la relatividad general, y que incluya algún tipo de campo que sea capaz de producir la expansión acelerada y dar cuenta simultáneamente de todos los datos de dinámica galáctica disponibles. Por último, podría tratarse de algún tipo de extraño fluido energético, que algunos científicos han denominado *quintaesencia*, aún no observado, que llenara el espacio y fuese capaz de producir sobre la expansión un efecto contrario al de la materia y la energía «normal». Decidir cuál de estas (u otras) explicaciones es la correcta solo tiene un camino: obtener más y mejores datos experimentales. De la segunda pieza del rompecabezas, la materia oscura, se tiene más certeza sobre lo que no es que sobre su naturaleza concreta. Como su propio nombre indica es «oscura», es decir, no tiene forma de estrellas o planetas «visibles», cuya masa total es mucho menor que la que se requiere. No se encuentra en forma de agregados invisibles de materia normal «bariónica» (compuesta fundamentalmente por protones y neutrones), ya que ese tipo de materia puede detectarse fácilmente a partir de los efectos que produce sobre la radiación que

acelerando desde su inicio, en contra de lo que se esperaba, un hecho que podría explicarse de manera simple con un término cosmológico como el de Einstein. La explicación definitiva de este hecho experimental no ha podido establecerse aún, pero ha dado lugar a la formulación de una nueva hipótesis con un gran «atractivo»: la energía y la materia oscuras.

la atraviesa. Tampoco es antimateria, ya que si lo fuese se detectaría la señal específica del proceso de aniquilación partícula-antipartícula: un par de fotones con energía igual a la masa de las partículas que se aniquilan multiplicada por c^2. Finalmente, no puede tratarse de agujeros negros, ya que el efecto que estos producen sobre la luz proveniente de objetos alejados de ellos (curvan la trayectoria de esa luz) es fácilmente identificable y no se observan eventos tales en número suficiente para dar cuenta de la cantidad de materia oscura necesaria. Entre las posibilidades que se barajan actualmente están los «objetos de halo compacto masivos» y las «partículas masivas débilmente interactuantes» (MACHOs y WIMPs, por sus siglas en inglés, respectivamente). Los primeros incluirían materia bariónica en enanas marrones o en pequeños y densos agregados de elementos pesados. Las segundas, partículas como neutrinos, axiones, neutralinos, etc. Los datos experimentales más recientes parecen decantarse por los WIMPs y, específicamente, por los axiones y neutralinos, que aún deben ser observados.



Según las últimas medidas del observatorio espacial Planck (un proyecto de la Agencia Espacial Europea con contribución de la NASA y de Canadá), el universo, que tendría una antigüedad de 13800 millones de años, está compuesto en su mayor parte por energía y materia oscuras, tal como se muestra en el gráfico, mientras que la materia llamada «normal» ocuparía un porcentaje mínimo.

La aseveración de Gamow en su autobiografía sobre la equivocación de Einstein ha dado lugar a una buena cantidad de artículos que han tratado de establecer si realmente Einstein dijo tal cosa o, como en otras ocasiones, se trataba de una exageración de Gamow. Algunos autores piensan que podría haberse tratado simplemente de un problema de traducción, ya que Einstein y Gamow bien podrían haber discutido en alemán, un idioma que ambos dominaban mejor que el inglés. Otros creen que la expresión era demasiado «fuerte» para el estilo usual de Einstein, incluso con sus más allegados, aunque no cabe duda de su «arrepentimiento» en relación al famoso término. En 1947, en una carta a Lemaître decía:

> Desde que introduje este término [cosmológico] Λ, tuve mala conciencia. Pero en ese momento no pude ver otra posibilidad para tener en cuenta el hecho de la existencia de una densidad promedio finita de materia. Encontré ciertamente muy desagradable que la ley de campo de la gravitación tuviera que estar compuesta por dos términos independientes, que están conectados por una suma. Sobre la justificación de esos sentimientos acerca de la simplicidad lógica es difícil argumentar. No puedo dejar de sentirlo fuertemente y soy incapaz de creer que algo tan desagradable pueda ocurrir en la naturaleza.

No obstante, parece que no cabe duda del carácter hiperbólico de Gamow. En su libro *Grandes equivocaciones: de Darwin a Einstein. Errores colosales de grandes científicos que cambiaron nuestro entendimiento de la vida y el universo*, el astrofísico y divulgador científico Mario Livio menciona un artículo de Stephen Brunauer, un químico húngaro de nacimiento, que trabajó para el Gobierno estadounidense durante la Segunda Guerra Mundial y que fue el que reclutó a Einstein y Gamow como consultores de la Armada. En dicho artículo, Brunauer indica que no era cierto que Gamow fuese la persona de enlace con Einstein y que no lo visitaba tan a menudo como decía en su autobiografía. Según Livio, Gamow exageró sobre su relación con Einstein. Como muchos otros.

LA BOMBA DE HIDRÓGENO

Pasada la guerra, en 1948, Gamow fue finalmente autorizado a trabajar en cuestiones secretas y fue invitado por Norris Edwin Bradbury, que ejerció como director del Laboratorio Nacional de Los Álamos desde 1945 a 1970, a unirse al equipo que estaba desarrollando la tecnología necesaria para fabricar una bomba termonuclear. Había sido precisamente Teller quien había abogado ante Bradbury para que cursara la invitación a Gamow y este la aceptó. El proyecto estuvo liderado por el propio Teller y por el matemático Stanislas Ulam (1909-1984), polaco de nacimiento, y dio lugar a varias pruebas durante 1951 que culminaron el 8 de mayo con *George*, la primera explosión verdaderamente termonuclear llevada a cabo en el mundo, que permitió validar todos los aspectos básicos necesarios para una bomba H a escala completa, incluyendo una bomba de fisión como parte del explosivo iniciador. El ensayo, *Ivy Mike*, tuvo lugar en noviembre de 1952 en el atolón Enewetak, situado en el Pacífico, que fue repetidamente utilizado para este tipo de pruebas.

Desafortunadamente, no se conoce casi ningún detalle acerca del trabajo que efectivamente llevó a cabo Gamow durante su estancia en Los Álamos. Según él, su mayor contribución a la bomba de hidrógeno fue sencillamente invitar a Teller a la Universidad George Washington y conseguir que fuera a Estados Unidos. En su autobiografía no menciona ninguna otra anécdota ni actividad específica. Teller se refería al trabajo teórico que realizaron entonces en relación a las reacciones termonucleares como «el *juego de Gamow*, del que Bethe era siempre el ganador». Probablemente tenía en mente los trabajos de este sobre la producción de energía en las estrellas.

Para concluir, digamos que en 1954, cuando Teller testificó contra Robert Oppenheimer en el proceso por deslealtad al que este se vio sometido, Gamow mostró su disconformidad con los cargos de los que se le acusaba y seguramente afeó a Teller su actuación, pero no hay ningún testimonio acerca de cuál era su opinión sobre la persecución que puso en marcha el senador McCarthy contra tantos escritores, actores, profesores universi-

tarios y diplomáticos. Años después, Gamow, Bethe y Weisskopf apoyaron públicamente que Frank Oppenheimer, hermano menor de Robert, físico de partículas cuya carrera como profesor universitario había sido truncada también al mismo tiempo que la de su hermano, volviera a ejercer en la Universidad de Colorado.

¿CÓMO FUNCIONA EL ADN?

El premio Nobel de Fisiología o Medicina del año 1962 fue concedido a los biólogos moleculares Francis Crick (1916-2004), británico, James Dewey Watson (n. 1928), estadounidense, y Maurice Wilkins (1916-2004), también británico, por sus descubrimientos relativos a la estructura molecular de los ácidos nucleicos y su significación para la transferencia de información en el material viviente. Esos descubrimientos databan de 1953, año en el que Crick y Watson habían publicado dos artículos en *Nature*: «Estructura molecular de los ácidos nucleicos: una estructura para el ácido desoxirribonucleico», aparecido en abril, e «Implicaciones genéticas de la estructura del ácido desoxirribonucleico», publicado en mayo. En esos artículos, los dos investigadores proponían la célebre estructura de doble hélice de la molécula de ADN y el procedimiento de codificación de las instrucciones genéticas necesarias para el desarrollo de los seres vivos. En su propuesta habían jugado un papel muy relevante los datos experimentales (fundamentalmente imágenes de rayos X) obtenidos por Wilkins y por la biofísica británica Rosalind Franklin (1920-1958).

Al parecer los artículos en cuestión cayeron en manos de Luis Walter Álvarez, un físico estadounidense nieto de asturianos, premio Nobel de Física en 1968 por el descubrimiento de numerosas resonancias de partículas elementales mediante la cámara de burbujas de hidrógeno, que se los mostró a Gamow, entonces profesor visitante en Berkeley, California. ¿Por qué Álvarez comentó un tema de biología molecular con Gamow? Es cierto que puede entenderse como natural que dos investigadores estén interesados en los logros de cualquier otro ámbito científico, máxime si son de

un alcance tal. Pero también es probable que Álvarez conociera el interés de Gamow por la biología, a tenor de la publicación de su último libro de divulgación, titulado *El señor Tompkins aprende los hechos de la vida*, en el que describía aspectos de biología básica acerca del funcionamiento del cuerpo humano.

Pero Gamow ya había puesto de manifiesto con anterioridad que la relación entre la física y la biología podía ser un campo de investigación con futuro. En 1946, acabada la guerra, la Conferencia de Física Teórica de Washington se dedicó a la «Física de la materia viva». Gamow quería conocer cómo funcionaban los entes vivos y congregó a biólogos y físicos para hablar de los genes y su papel en la herencia, del intercambio de energía en los procesos celulares, las reacciones químicas en los tejidos vivos, la fotosíntesis, etc. Aquella conferencia fue una de las primeras reuniones interdisciplinares en el campo de la biofísica y señalaba una vez más la destacada capacidad de Gamow para entrever problemas científicos relevantes, como el tiempo se ha encargado de demostrar.

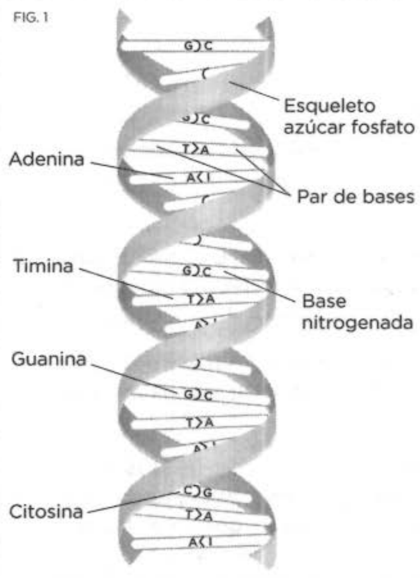
Sin embargo, Gamow no era el primer físico que se interesaba por la biología. Por poner dos ejemplos próximos, podemos citar a Schrödinger y a Max Delbrück (1906-1981). El primero, premio Nobel de Física en 1933 por sus trabajos en mecánica cuántica, había escrito en 1944 un libro titulado *¿Qué es la vida? El aspecto físico de la célula viva*. El segundo, físico, trabajó con Meitner en Berlín. Tras emigrar a Estados Unidos, empezó a trabajar en biología molecular y ganó el premio Nobel de Fisiología o Medicina en 1969, compartido con el estadounidense Hershey y el italiano Luria, por sus descubrimientos sobre el mecanismo de replicación y la estructura genética de los virus. Delbrück y Gamow fueron muy amigos desde que coincidieron en los primeros años treinta en Copenhague.

De lo que no cabe duda es de que la lectura de ambos trabajos produjo un gran impacto en George, que el 8 de julio, apenas un mes después de la aparición del segundo de los artículos de Watson y Crick, les escribió una carta que puede considerarse como el inicio de un problema fundamental, la búsqueda del código genético, es decir, del conjunto de reglas que debían relacionar la

EL ÁCIDO DESOXIRRIBONUCLEICO

Tres son los tipos de macromoléculas esenciales en todas las formas de vida conocidas: los carbohidratos, las proteínas y los ácidos nucleicos. Uno de estos últimos es el ácido desoxirribonucleico (ADN). Se trata de una molécula que contiene el código de todas las instrucciones necesarias para el desarrollo y funcionamiento de todos los organismos vivos conocidos y de muchos virus. Su estructura es la de dos biopolímeros enrollados entre sí formando una doble hélice (figura 1). Estos biopolímeros están constituidos por unidades más sencillas llamadas *nucleótidos* que, a su vez, están formados por una base (que contiene nitrógeno), una molécula de azúcar, la desoxirribosa, y un grupo fosfato. Los nucleótidos se disponen formando una cadena en la que el azúcar de uno se une al grupo fosfato del siguiente, de manera que lo que es relevante desde el punto de vista de la información biológica es, por tanto, el ordenamiento a lo largo del biopolímero de las bases nitrogenadas. Estas son de cuatro tipos: adenina, timina, citosina y guanina. Las bases de los dos biopolímeros que forman la doble hélice se unen mediante enlaces de hidrógeno, pero solo están permitidos los enlaces adenina-timina y citosina-guanina. De esta forma se garantiza que la información biológica está replicada en cada uno de los dos biopolímeros, en los que, por otra parte, las bases están ordenadas en direcciones opuestas. Combinando las cuatro bases de tres en tres se forman los *codones*, que contienen la información codificada correspondiente a los aminoácidos.

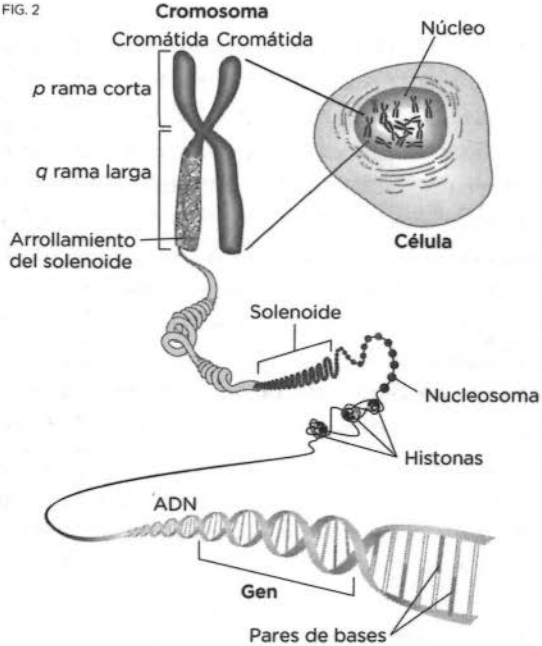
FIG. 1



Los genes

Un gen, la unidad de información necesaria para sintetizar cada macromolécula con función celular específica, es una secuencia de nucleótidos a lo largo de uno de los biopolímeros del ADN, que incluye codones de inicio y fin, además de otros elementos regulatorios: especifica la secuencia de aminoácidos que deben unirse para formar las proteínas, las moléculas de cuya presencia y/o actividad dependen todos los procesos biológicos específicos de la célula correspondiente. El

FIG. 2



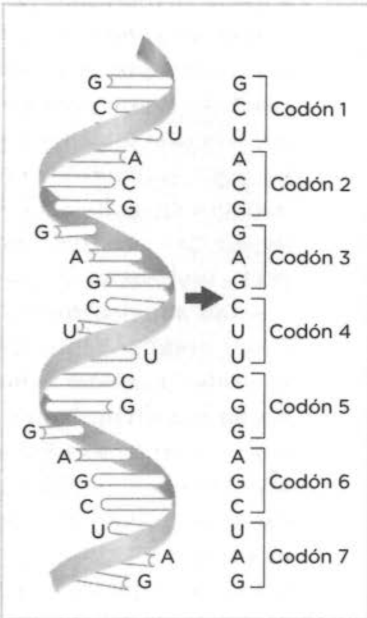
código genético tiene dos características fundamentales: es prácticamente universal, siendo usado por casi todos los organismos vivos, y es «degenerado», es decir, que cada aminoácido puede estar codificado en más de un codón. Los organismos eucariotas (todos los organismos vivos excepto los virus y algunas bacterias) se caracterizan por tener células con un núcleo en el que la molécula de ADN está empaquetada. Justo antes de que se produzca la división celular, en el proceso de mitosis, la molécula de ADN es replicada y las dos copias resultantes se organizan en estructuras denominadas *cromosomas*. Como se observa en la figura 2, el ADN se enrolla alrededor de las denominadas *histonas*, proteínas que proporcionan el soporte estructural y controlan las actividades de los genes. Estas, con el ADN correspondiente, se agrupan en paquetes de 8 unidades para formar los *nucleosomas*, que, a su vez, se enrollan para formar el *solenoide*. El arrollamiento adicional de las espirales da lugar al cromosoma, que está formado por dos estructuras de forma longitudinal llamadas *cromátidas*, cada una de las cuales presenta una rama corta, *p*, y otra larga, *q*. En la división celular, los cromosomas se separan en las dos cromátidas, quedando cada una de ellas en cada una de las dos células hijas.

información sobre la herencia contenida en el ADN con las proteínas, las responsables del desarrollo de los cuerpos vivos. Schrödinger ya había aludido en el libro antes mencionado a la «secuencia de comandos de la herencia» que podría especificar la diferencia entre «un rododendro, un escarabajo, un ratón o una mujer», mencionando el código Morse como ejemplo de método para codificar un número inmenso de mensajes mediante un reducido número de símbolos. La pregunta clave que Gamow se hizo era aparentemente simple: ¿cómo se pueden relacionar las bases presentes en la molécula de ADN (adenina-A, timina-T, citosina-C y guanina-G) con los aminoácidos constituyentes de las proteínas, los bloques fundamentales de todo lo vivo? Gamow hizo una hipótesis fundamental: la determinación del código genético no requería del conocimiento de la química básica involucrada en los procesos. La consecuencia de esta hipótesis fue que el problema se reducía a un problema puramente numérico: con un alfabeto de cuatro «letras» (las bases) había que escribir «palabras», 20 en total, los *aminoácidos proteicos* (también conocidos como *canónicos* o *naturales*), con los que se escribían las «frases», las proteínas.

Gamow publicó en 1954 tres artículos en los que describió los distintos análisis que llevó a cabo. Primero escribió una breve nota en *Nature*, «Posible relación entre el ácido desoxirribonucleico y la proteína», a la que siguieron dos trabajos en la revista de la Academia de Ciencias de Dinamarca, *Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, Biologiske Meddelelser*, titulados «Sobre la transferencia de información de los ácidos nucleicos a las proteínas» y «Posible relación matemática entre el ácido desoxirribonucleico y las proteínas». Al año siguiente publicó un artículo de divulgación en *Scientific American*: «Transferencia de información en la célula viva». El código más sencillo que propuso Gamow partía de un análisis combinatorio de las posibilidades existentes a partir de las cuatro bases del ADN. Evidentemente, el número de posibles combinaciones de dos bases que podrían generarse sería $4 \times 4 = 16$ que es insuficiente porque como hemos dicho antes eran necesarias al menos 20 combinaciones para poder codificar los 20 aminoácidos naturales. La solución de

EL ÁCIDO RIBONUCLEICO

La molécula de ADN contiene codificada la información necesaria para sintetizar las proteínas. Sin embargo, esa síntesis no se lleva a cabo directamente a partir del ADN, sino de otro ácido nucleico que se denomina *ácido ribonucleico* (ARN). El ARN tiene una estructura similar a una de las cadenas del ADN, pero, en lugar de la molécula de desoxirribosa, contiene una molécula de otro azúcar, la ribosa, y la base timina está sustituida por otra denominada uracilo. Las moléculas de ARN más relevantes son las que se denominan *ARN de transferencia, ARN ribosómico* y *ARN mensajero.* El ARN mensajero (ARNm) se llama también *ARN codificante* y es una réplica del trozo de ADN correspondiente a la secuencia de aminoácidos que conforman una proteína completa. El ARN ribosómico (ARNr) es es el más abundante en las células y se encarga de ir «leyendo» en el ARNm las secuencias correspondientes a los distintos aminoácidos e ir sintetizándolos hasta completar la proteína correspondiente. Finalmente, el ARN de transferencia transporta un aminoácido asociado hasta la posición correspondiente, marcada en el ARNm y determinada por el ARNr.



Gamow fue la más simple: los aminoácidos deben codificarse con 3 bases. Esto, claro, permite obtener hasta $4 \times 4 \times 4 = 64$ «palabras» de 3 «letras». Gamow supuso que existían «sinónimos», es decir, que seguramente existían algunas combinaciones que codificaban el mismo aminoácido. La correspondencia final entre las combinaciones posibles y los aminoácidos reales debía establecerse, lógicamente, mediante los adecuados experimentos, ya que continuar con el mero ejercicio matemático podría dar lugar a solu-

ciones absurdas. A pesar de ello, investigadores tan relevantes como Feynman, Delbrück, Von Neumann, Teller y el propio Crick acompañaron a Gamow en el juego proponiendo soluciones más o menos complejas. Una de las que Gamow propuso se basaba en contar las posibles secuencias de 3 bases construidas a partir de los cuatro tipos de bases, imponiendo, además, que el orden de las bases no fuera importante; estas serían las siguientes: las cuatro secuencias con la misma base repetida (AAA, TTT, CCC y GGG), las doce secuencias con dos bases repetidas y una diferente (del tipo, por ejemplo, AAT, CGC o TAT) y, finalmente, las cuatro combinaciones con tres bases diferentes (ATC, TCG, GAT, ACG). Es decir, un total de 20, justo las necesarias.

Los experimentos realizados por Crick y otros bioquímicos, como Severo Ochoa, y Marshall Warren Nirenberg y Har Gobind Khorana (premios Nobel de Fisiología en 1959 y 1968, respectivamente), demostraron que la hipótesis de Gamow de la codificación con tres bases para dar lugar a un código universal era absolutamente correcta. También resultó correcta la cuestión de los «sinónimos», aunque la realidad es más complicada de lo que el modelo sencillo que antes hemos descrito establece, es decir, que el orden de las bases no es irrelevante. En el libro mencionado al principio del capítulo, Crick relata cómo la carta de Gamow les sugirió a Watson y a él escribir la lista de los 20 aminoácidos canónicos. Y añade:

> La importancia del trabajo de Gamow fue que era realmente una teoría abstracta de codificación y no estaba llena de un montón de detalles químicos innecesarios, aunque su idea básica de que el ADN era el patrón para la síntesis de las proteínas era, de hecho, bastante erróneo. De lo que él se dio cuenta claramente fue de que un código con solapamiento ponía restricciones sobre las secuencias de aminoácidos y que sería posible entonces probar, o al menos refutar, distintos códigos estudiando secuencias de aminoácidos conocidas.

Los *códigos con solapamiento* a los que se refiere Crick fueron propuestos por distintos investigadores (Gamow entre ellos) y se caracterizaban porque los aminoácidos que se encontraban

en posiciones contiguas compartían forzosamente algunas de sus bases. Posteriormente, el biólogo sudafricano Sydney Brenner, premio Nobel de Fisiología en 2002, demostró que este tipo de códigos no eran posibles, precisamente porque las restricciones que impondrían sobre cuáles podrían ser los aminoácidos «vecinos» en una proteína no ocurrían en la realidad.

Obviamente, Gamow no podía dejar pasar la oportunidad de introducir un divertimento en este ámbito novedoso y ajeno, así es que, con la colaboración de Watson, fundó un club reservado: el Club de la Corbata de ARN. Estaba formado por veinte miembros (uno por cada aminoácido natural) y cuatro miembros honorarios (uno por cada base). Entre otros pertenecieron al club Yčas (bioquímico lituano amigo de Gamow), Delbrück, Brenner, Crick, Watson, Teller y Metropolis (físico y matemático estadounidense de origen griego), todos ellos interesados en el problema del código genético. Cada uno de los miembros tenía asignado el nombre de un aminoácido y debían portar una corbata y el correspondiente alfiler con un anagrama diseñado por Gamow. Pero diversión aparte, las reuniones de los miembros del club fueron útiles y productivas.

La actividad de Gamow en el campo fue, a pesar de todo, bastante reducida en el tiempo. Probablemente fue consciente enseguida de la complejidad que se alcanzó en el mismo, y que además requería un intenso trabajo experimental muy especializado. En 1958 escribió con Yčas su último trabajo sobre la codificación, «La aproximación criptográfica al problema de la síntesis de proteínas», que apareció en un libro publicado en Alemania. Más tarde, en 1963, escribió dos artículos, «El origen de la vida» y «¿Qué es la vida», para una revista de la India. Pero en 1961 había publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences* un curioso trabajo, firmado con W. Brittin, un colega de la Universidad de Colorado, titulado «Entropía negativa y fotosíntesis». El artículo lo dedicaron a Schrödinger y la primera frase reza: «Como fue sugerido por E. Schrödinger, el mantenimiento de la alta organización de los seres vivos es debido a un continuo influjo de entropía negativa». La conclusión no deja de ser llamativa: «Así concluimos que, si el proceso de fotosíntesis tiene al menos un 10% de eficiencia en la conversión de entropía, el crecimiento de una planta a la luz

del sol es consistente con la segunda ley de la termodinámica». Sin duda, otra prueba de la curiosidad innata de Gamow y de su «atrevimiento» para abordar problemas de toda índole.

A partir de ese momento, su interés se centró en gran parte en popularizar la ciencia. Pero esta actividad divulgativa de Gamow había empezado bastante antes. En su autobiografía señala que no tenía claro por qué había empezado a escribir para los legos. Según él, en su afán por simplificar y aclarar los problemas para él mismo se había dado cuenta de que ese esfuerzo podía ser útil para los demás. Pero sí que recordaba cómo siendo estudiante le gustaba dar charlas informales sobre temas científicos complejos. En cualquier caso, 1937 marcó el punto de partida de otra línea de trabajo que se convirtió en una de las más prolíficas y exitosas de George.

CIENCIA PARA TODOS

El Sr. C.G.H. Tompkins tenía marcado desde su nacimiento el objetivo de su vida: enseñar física en particular y ciencia en general. Pero sus alumnos predilectos, lejos de ser destacados estudiantes de una facultad científica, fueron (aún lo son) abogados, hombres de negocios, humanistas, personas en general inteligentes, pero iletradas en lo que a la ciencia se refiere. Es decir, sus iguales. El Sr. Tompkins, un modesto empleado de banca que descubre un buen día su pasión por las ciencias, vino al mundo en 1937 como protagonista de una serie de historias cortas escritas por Gamow y que tenían por escenario un universo caprichoso en el que las constantes físicas tenían valores muy diferentes de los reales, permitiendo, de esta forma, amplificar los efectos ligados a ellas. El juego con las constantes no era ajeno a Gamow. En 1926 había publicado, en una revista rusa, un artículo con Landau e Ivanenko titulado «Constantes universales y transiciones limitantes», en el que estudiaban la transición entre mecánica cuántica y mecánica clásica cuando la constante de Planck, h, el inverso de la velocidad de la luz en el vacío, $1/c$, y la constante de la gravitación universal, G, se hacían tender a cero.

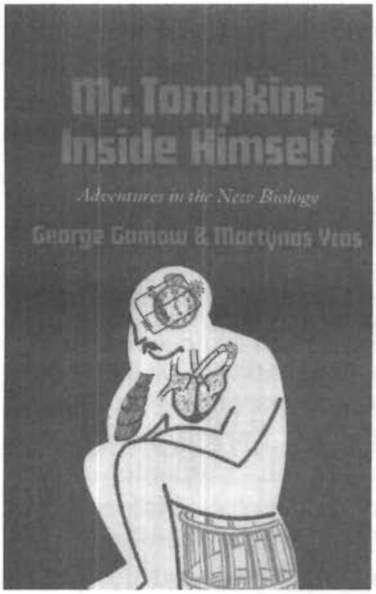






FOTO SUPERIOR IZQUIERDA:
Portada de *Mr. Tompkins inside Himself*, la última de las novelas de la serie, escrita conjuntamente con su amigo Martynas Yčas.

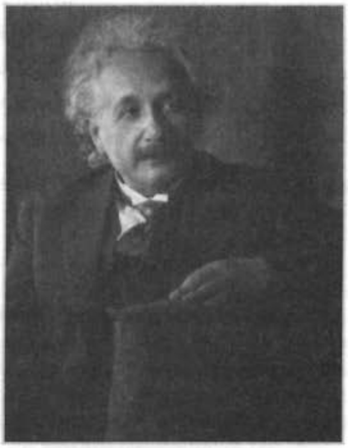
FOTO SUPERIOR DERECHA:
Las hipótesis de Gamow fueron trascendentales para que Watson y Crick (en la imagen) profundizaran en el funcionamiento del ADN.

FOTO INFERIOR:
Cuatro de los miembros del Club de la Corbata de ARN, fundado por Gamow y Watson en 1954: Francis Crick, Alexander Rich, Leslie Orgel y James Watson.

Un universo de juguete fue el título de las primeras aventuras del Sr. Tompkins, que Gamow envió primero a *Harper's Magazine*, a *The Atlantic Monthly*, *Coronet* seguidamente, y a otras revistas después, y en todas ellas le rechazaron el manuscrito. En mayo de 1938, Gamow asistió en Varsovia a un congreso sobre «Nuevas teorías en física», que había organizado un instituto relacionado con la Liga de Naciones y que resultó una conferencia de alto nivel a la que asistieron, entre otros, Bohr, Møller, Eddington, Darwin (nieto del famoso naturalista inglés), Langevin, Brillouin, Wigner, Von Neumann, Goudsmit y Rosenfeld. Darwin y Gamow eran buenos amigos desde los tiempos de Cambridge y en una de sus conversaciones, George se lamentó de su fracaso con sus historias populares. Darwin le sugirió que enviase el trabajo a Snow, un físico y novelista británico que por aquel entonces actuaba como editor de la revista *Discovery*, que publicaba mensualmente la editorial Cambridge University Press. Y así lo hizo. Y casi de inmediato recibió la respuesta positiva de Snow, que le anunció que el cuento iba a aparecer en el número siguiente y le demandaba más historias. El éxito fue notable y la editorial le pidió a Gamow que escribiese un libro recopilatorio con los cuentos ya publicados y alguno más. En 1939 apareció en las librerías *El Sr. Tompkins en el País de las Maravillas: o historias de c, G y h*.

De acuerdo con el relato de Gamow, el nombre de Tompkins lo eligió porque le hacía gracia, le sonaba bien. El apellido era el de un estudiante de matemáticas que conoció en uno de sus cursos y que luego estuvo encargado de los ordenadores en la Universidad de California, en Los Ángeles. En cuanto a las iniciales, son evidentes: C.G.H. corresponden a la velocidad de la luz, la constante de gravitación universal y la constante de Planck. El Sr. Tompkins asiste regularmente a las conferencias que imparte un barbado profesor, con el que traba amistad tras varias de sus charlas y con cuya hija, Maud, acaba casándose. La primera aventura del Sr. Tompkins ocurre después de escuchar una lección del profesor sobre la teoría especial de la relatividad y, a continuación, dormirse plácidamente en el auditorio. En su sueño se encuentra en una ciudad donde la velocidad de la luz en el vacío

LA TEORÍA DE LA RELATIVIDAD ESPECIAL


Albert Einstein en una fotografía tomada en 1931.

En 1905 Einstein estableció la teoría de la relatividad especial o restringida, que se basa en dos principios: a) las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas inerciales, y b) la velocidad de la luz en el vacío, c, es una constante universal independientemente del estado de movimiento de la fuente de luz. Utilizando las transformaciones de Lorentz, se puede ver que si un objeto se mueve con velocidad v respecto de un observador, este ve que la longitud l del objeto en la dirección del movimiento se acorta y mide un valor $l' = l/\gamma$, siendo $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, el denominado *factor de Lorentz*. A medida que v se va haciendo más y más grande, aproximándose a c, la longitud l' que mide el observador se va haciendo más y más pequeña. Las dimensiones del objeto en las otras dos direcciones perpendiculares a la del movimiento no se modifican y el objeto se achata pues en la dirección del movimiento. Asimismo, si un cierto proceso requiere un tiempo t para completarse y lo observamos desde un sistema que se mueve con velocidad v respecto de él, mediremos que el tiempo que tarda en llevarse a cabo es mayor y viene dado por $t' = t\gamma$. Cuanto mayor sea v, más largo en el tiempo será el proceso para el observador en movimiento. Estos dos resultados son conocidos como la *contracción de longitudes* y la *dilatación temporal relativistas*. Además, se demuestra que la masa del objeto en movimiento también cambia cuando la mide el observador en reposo: $m' = m\gamma$. La masa aumenta con la velocidad, tendiendo a hacerse infinita cuando $v = c$, lo que muestra que c es una velocidad límite. En cuanto a la energía total del sistema, esta viene dada por $E = mc^2 + mv^2/2$, que en el caso de que $v = 0$ resulta la famosa ecuación $E = mc^2$, que nos da la equivalencia entre masa y energía.

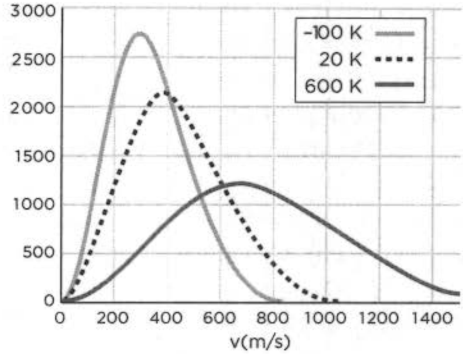
no es mucho mayor de 20 km/h y los efectos de los que ha oído hablar al profesor se hacen patentes: un ciclista que se acerca a él aparece más corto y cuando él mismo pedalea en una bicicleta observa cómo todos los edificios y las personas con las que se

va encontrando también son más cortos, dándose cuenta de que todo lo que se mueve con respecto a él se acorta en la dirección del movimiento, y así entiende el concepto de «relatividad».

El Sr. Tompkins aprende a continuación acerca de los espacios curvados y visita un pequeño planeta en un pequeño universo en expansión. Y seguidamente entra en el mundo cuántico. El profesor le enseña los rudimentos de la teoría mediante un «billar

EL DIABLO DE MAXWELL

FIG. 1



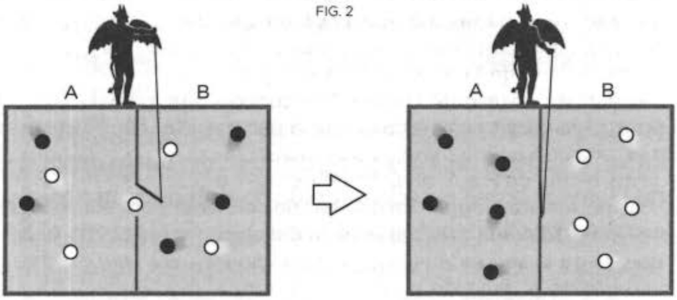
La segunda ley de la termodinámica indica que cuando dos cuerpos a distinta temperatura se ponen en contacto aislados del resto del universo, evolucionan hasta alcanzar el equilibrio termodinámico en el que ambos tendrán la misma temperatura. Otra forma de enunciar esta ley es que en un sistema aislado, la entropía nunca disminuye. En 1897, Maxwell, en una carta al físico Peter Tait, propone un experimento hipotético en el que un ser de facultades especiales, el diablo de Maxwell, es capaz de detectar la velocidad de las moléculas de un gas en un contenedor estanco. Maxwell supone que ese contenedor está dividido en dos partes que se encuentran llenas del mismo gas y a la misma temperatura. La velocidad de las moléculas de un gas sigue una distribución de Maxwell-Boltzmann como las que se muestran, a modo de ejemplo, en la figura 1 y dependen de la temperatura del gas. Nuestro diablo observa las moléculas del gas encerrado (figura 2) y cuando una molécula con velocidad superior a la media se acerca desde la parte A a la B, abre la puerta y le permite pasar. De igual manera, si una molécula con velocidad inferior a la media se aproxima de B a A, el diablo le permite pasar. Después de un cierto tiempo haciendo este juego, el diablo habría conseguido que la temperatura del gas en la parte A sea más baja que la del encerrado en la parte B, lo que iría en contra de la segunda ley de la termodinámica. Es importante que el demonio permita el flujo de partículas en ambas direcciones para que la

cuántico» y el Sr. Tompkins sueña que participa en una cacería que tiene lugar en una «selva cuántica». Más adelante conoce también al «diablo de Maxwell».

Casi al mismo tiempo en el que recibió la propuesta para publicar el primer libro sobre el Sr. Tompkins, le pidieron a Gamow que escribiera un libro de divulgación para la editorial *The Viking Press*. Fue así como surgió, en 1940, *El nacimiento y la muerte*

presión a ambos lados de la división sea la misma, lo que significa que en A debe acabar habiendo más moléculas que en B. Si esto fuera así, se podría operar una máquina térmica que produjese energía usando A y B como los focos caliente y frío. Por supuesto, regulando el paso de las moléculas de un lado al otro, el demonio podría generar una diferencia de presión entre A y B manteniendo la temperatura igual en ambos lados. En ese caso se podría poner un pistón entre ambas partes del contenedor y generar energía con el flujo de gas a que daría lugar la diferencia de presión. Además el resultado final sería, en cualquiera de los dos casos, un sistema más ordenado y, por tanto, con menor entropía. Aparentemente este proceso violaría la segunda ley de la termodinámica si se considera únicamente el contenedor con el gas; sin embargo, el «sistema aislado» a que se refiere esta incluye también, obviamente, al diablo de Maxwell que necesita «invertir» energía para identificar la velocidad de las moléculas antes de permitirles o no el paso de una parte a otra del contenedor. En ese proceso, además, el diablo «ganaría entropía» en una cantidad tal que el balance total siempre sería positivo. No se ha observado experimentalmente hasta ahora ningún proceso en el que la segunda ley de la termodinámica no se cumpla.

FIG. 2



del Sol: evolución estelar y energía subatómica, un libro en el que planteaba de forma sencilla sus conocimientos sobre la evolución de las estrellas y que, con el paso del tiempo y cuando estos quedaron obsoletos, dio lugar a otro libro popular, *Una estrella llamada el Sol*, que apareció en 1964 publicado por la misma editorial.

«La gente me pregunta a menudo cómo hago para escribir libros que tienen tanto éxito. Bien, es un secreto muy bien guardado, tan bien guardado que yo mismo desconozco la respuesta.»

— George Gamow.

El segundo libro de aventuras del Sr. Tompkins, *El Sr. Tompkins explora el átomo*, apareció en 1944. Ahora nuestro personaje viaja convertido en un *electrón de conducción*. También visita el interior del núcleo, conoce los quarks y la antimateria y se despierta de su sueño justo en el momento en que se aniquila tras encontrarse con un positrón.

Especialmente interesante es *El Sr. Tompkins aprende los hechos de la vida*, que apareció en 1953 y en el que, como decíamos antes, Gamow se interesa por la biología. El Sr. Tompkins, en su primer sueño aquí, se las arregla para viajar siguiendo su propio flujo sanguíneo en compañía de una molécula de vitamina C y varios virus de la gripe. El sueño en esta ocasión termina en el estómago un momento antes de ser digerido. El segundo sueño se desarrolla en el interior de la célula, conociendo los cromosomas y los genes. Y el último trata del cerebro, las neuronas, las sinapsis, etc. Gamow insistió en la biología en su última entrega del singular personaje: *El Sr. Tompkins dentro de sí mismo: aventuras en la nueva biología*, que se publicó en 1967 y que escribió con su amigo Martynas Yčas. Las historias del Sr. Tompkins se publicaron en Rusia en 1994 por primera vez; hasta entonces el trabajo de Gamow había estado censurado debido a su pasado como «desertor». En 2010, publicado por el hijo de Gamow, el Sr. Tompkins tuvo una secuela en cómic, *Las aventuras del Sr. Tompkins*.

La literatura popular producida por Gamow fue más allá de las historias del Sr. Tompkins. Además de los dos libros ya men-

cionados antes, su producción fue singularmente extensa y cabe destacar los siguientes títulos: *Biografía de la Tierra* (1941), *Uno, dos, tres... infinito* (1947), *La creación del universo* (1952), *Biografía de la Física* (1961), *Gravedad* (1962) y *Treinta años que sacudieron la Física: la historia de la teoría cuántica* (1966). Y entre 1948 y 1961 publicó además varios artículos (casi uno por año) en *Scientific American* en los que trató todos los aspectos relevantes de su investigación de un modo asequible y sencillo: «Galaxias en vuelo», «El origen del hielo», «Supernovas», «Cosmología moderna», «Transferencia de información en la célula viva», «El principio de incertidumbre» y «El principio de exclusión», son algunos de ellos.

Toda esta labor divulgadora le hizo merecedor en 1956 del premio Kalinga, que otorga la Unesco en reconocimiento al talento en la explicación de la ciencia y la tecnología al público en general. Fue instituido en 1952 y ganadores del mismo han sido, entre otros, De Broglie (1952), Russell (1953), Clarke (1961), Hoyle (1987), Kapitsa (1979), Attenborough (1981) y Fantoni (2001). Con el dinero recibido por el galardón, Gamow realizó un viaje a la India y Japón, que era, según confesó, uno de sus sueños.

SUS ÚLTIMOS AÑOS

A principios de 1955, Gamow se divorció de Lyubov y trató de alejarse de Washington. Tras pasar un tiempo en Berkeley se incorporó como profesor en la Universidad de Colorado, en Boulder, en 1956. En otoño de 1958 se casó con Barbara Perkins, directora de publicidad de Cambridge University Press. La había conocido con motivo de la publicación de la tercera entrega del Sr. Tompkins, pues ella se había encargado de la campaña publicitaria del libro y de su promoción, que había resultado bastante exitosa. El día de la boda hicieron una pequeña celebración y de vuelta a Boulder los detuvo la policía de carreteras. Gamow preguntó si había hecho algo incorrecto y el policía le dijo que sí, que había superado ligeramente el límite de velocidad y que por favor le

mostrara su permiso de conducir (la *license*, en inglés). Gamow, bien porque no lo entendió o bien porque le pudo, una vez más, sus ganas de guasa, le entregó al policía el certificado (*license*) de matrimonio que acababan de firmar. Barbara le aclaró qué era lo que el policía quería ver y este, después de comprobar los documentos, le pidió que condujese un poco más despacio, los felicitó por el reciente casamiento y no los multó.

En 1962 fallecieron Landau (a principios de año) y Bohr (en noviembre), al que había visitado por última vez el año anterior. La desaparición de sus dos amigos supuso para él un golpe importante. Desde 1960 había seguido su rutina de profesor y escritor de ciencia, con alguna publicación en el ámbito de la astrofísica y la cosmología. De entre sus últimas contribuciones científicas podemos destacar dos. La primera, titulada «¿Cambia la gravedad con el tiempo?», apareció en 1967 en la revista *Proceedings of the National Academy of Sciences*. En los agradecimientos reconoce las discusiones sobre los puntos desarrollados mantenidas con su amigo Ulam y le agradece «que se haya asegurado de que [el artículo] no contenga ningún error aritmético ni algebraico de los que adolecen usualmente los trabajos del autor». La segunda es el último de los artículos que envió a publicar y que apareció en *Physical Review Letters* en 1968 con el título «Propiedades observacionales del universo en expansión homogéneo e isótropo», que acababa anunciando más detalles para un trabajo próximo que lamentablemente nunca pudo escribir.

Gamow murió el 19 de agosto de 1968 en Boulder, a la edad de sesenta y cuatro años, debido a un fallo hepático. Desde tiempo atrás había sufrido de diversos trastornos como diabetes y problemas con el hígado, probablemente debidos a sus excesos con el alcohol. El verano anterior lo habían operado para eliminarle depósitos de colesterol en las carótidas y desde ese momento ya no se recuperó. En una carta dirigida a Alpher unos días antes le decía que «el dolor en el abdomen es insoportable y no cesa». No había perdido el contacto con él desde los tiempos de su tesis doctoral. De hecho, un trabajo de ambos, «Una posible relación entre las cantidades cosmológicas y las características de las partículas elementales», apareció publicado póstumamente en la revista



La figura de Gamow es una de las más relevantes de la primera mitad del siglo XX, un científico genial cuya curiosidad le llevó a abordar problemas de la más variada índole para aportar siempre ideas nuevas y excepcionales sobre cada uno de los problemas a los que se enfrentó, ya pertenecieran estos a la disciplina de la física, la astronomía o la biología.

de la *National Academy of Sciences* en octubre. Hasta el final siguió confiando en el conocimiento matemático de su antiguo estudiante de doctorado y en su buen juicio para las nuevas ideas.

La actitud de Gamow en la búsqueda del código genético es paradigmática y explica su manera de abordar cualquiera de los problemas de los que se preocupó a lo largo de su vida. En primer lugar, y era perfectamente consciente de ello, no le importó para nada ser alguien ajeno al tema concreto tratando de olisquear en un campo desconocido. Seguidamente, admitió como correcto un modelo preexistente (la doble hélice del ADN en ese caso) y partiendo de él se preocupó de las conclusiones a las que podía llegar sin plantearse los detalles del modelo o cómo podía verificar hasta qué punto era o no válido, al menos *a priori*. Finalmente, fue capaz de distinguir qué hechos eran relevantes para desarrollar su teoría y cuáles podían ser simplemente ignorados. Sin duda la actitud de un genio.

Lecturas recomendadas

GAMOW, G., *Biografía de la física*, Madrid, Alianza Editorial, 2007.

—: *Biografía de la física*, Madrid, Alianza Editorial, 2007.

—: *La creación del Universo*, Barcelona, RBA, 1993.

—: *Uno dos tres... infinito*, Madrid, Espasa-Calpe, 1969.

—: *El breviario del Sr. Tompkins*, Madrid, Fondo de Cultura Económica de España, 1993.

—: *El país de las maravillas*, Madrid, Fondo de Cultura Económica de España, 2010.

—: *El nuevo breviario del Sr. Tompkins*, Ciudad de México, Fondo de Cultura Económica de México, 2010.

GRIBBIN, J., *Historia de la ciencia, 1543-2001*, Barcelona, Crítica, 2003.

HAWKING, S., *Historia del tiempo*, Barcelona, Crítica, 2011.

HAWKING, S. y MLODINOW, L., *El gran diseño*, Barcelona, Planeta, 2013.

WATSON, J., *Genes, chicas y laboratorios*, Barcelona, Tusquets, 2006.

WEINBERG, S., *Los tres primeros minutos del Universo*, Madrid, Alianza Editorial, 2009.

Índice